N° d'ordre
A. O. 6096

THÈSE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR
DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

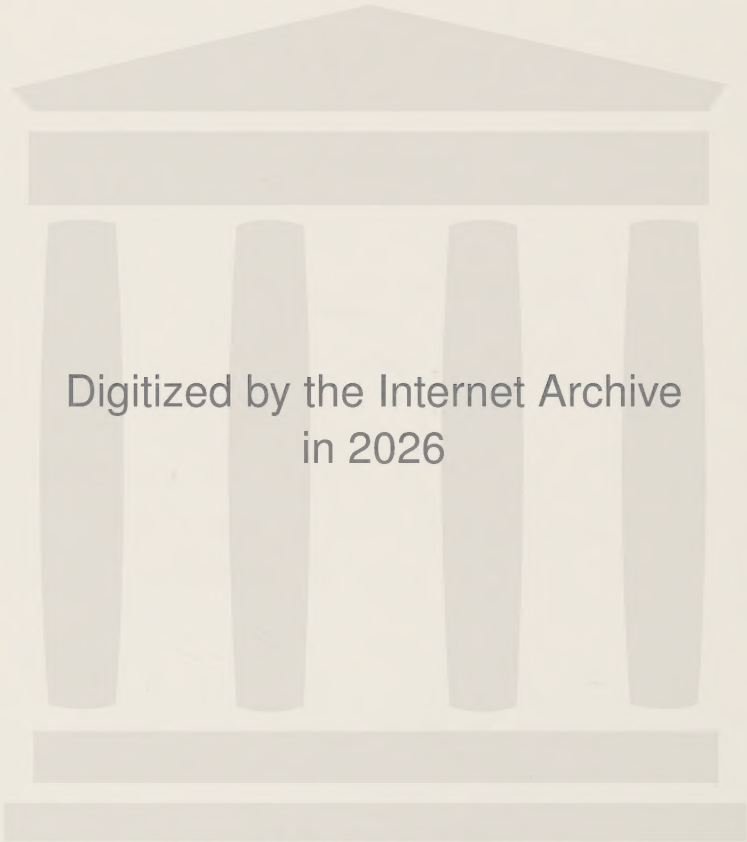
Raymond GRAS

EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX

Soutenue le 21 Septembre 1971 devant la commission d'examen :

MM. MILLOT — *Président*
WEY, HENIN — *Examinateurs*

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, Paris-7e


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548025_0010

N° d'ordre
A. O. 6096

THÈSE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR
DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Raymond GRAS

EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX

Soutenue le 21 Septembre 1971 devant la commission d'examen :

MM. MILLOT — *Président*
WEY, HENIN — *Examinateurs*

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, Paris-7e

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

NOTE AUX LECTEURS

Cette thèse a fait l'objet de trois articles indépendants publiés dans les *Annales agronomiques* :

I. — Comportement des éléments grossiers poreux vis-à-vis de l'eau.

II. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine - élément grossier : variations positives d'humidité.

III. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine - élément grossier : variations négatives d'humidité.

Il s'en suit que la numérotation des pages de la revue a été conservée.

PLAN

Introduction

I. — Comportement des éléments grossiers poreux vis-a-vis de l'eau

I. — La porosité, valeur de référence pour juger de la teneur en eau d'un corps poreux

1. 1. Considérations d'ordre général sur la porosité.
1. 2. Caractéristiques de la porosité des matériaux étudiés.

II. — Humectation directe par l'eau.

2. 1. Critique de la mesure d'humidité par dessiccation.
2. 2. Influence de la pression de l'air et de la durée d'humectation.

III. — Étude particulière de l'emprisonnement d'air.

3. 1. Explication des différences d'emprisonnement d'air entre les divers milieux.
3. 2. Essai d'interprétation des constatations expérimentales.

IV. — Influence des dimensions des échantillons sur leur remplissage.

4. 1. Résultats.
4. 2. Interprétation.

II. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine-élément grossier : variations positives d'humidité

I. — Dynamique de l'eau dans le sable.

1. 1. Dispositif expérimental.
1. 2. Généralités sur la circulation de l'eau dans un milieu poreux.
1. 3. Filtration en tube vertical avec plan d'eau.
1. 4. Infiltration dans un tube vertical avec plan d'eau en surface.
1. 5. Humectation verticale, sans plan d'eau.
1. 6. Humectation horizontale.

II. — Influence des éléments grossiers non poreux sur la dynamique de l'eau du sable

2. 1. Résultats.
2. 2. Essai d'explication. Composition des résistances hydrauliques.
2. 3. Essai d'explication dans le cas de l'humectation verticale sans plan d'eau.

PLAN

III. — Influence des éléments grossiers poreux sur la dynamique de l'eau.

3. 1. Résultats des expériences.
3. 2. Observation des déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et l'élément rigide.
3. 3. Interprétation de résultats expérimentaux.

IV. — Conclusion sur les effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau du sable.

4. 1. Front humide dans le sable au niveau de l'élément.
4. 2. Front humide dans le sable au-delà de l'élément.

V. — Humectation des matériaux poreux rigides par l'intermédiaire du sol.

5. 1. Expériences faisant varier la succion de la terre.
5. 2. Expériences en tube avec circulation de l'eau.
5. 3. Influence des succions relatives dans le matériau grossier et dans le sable.
5. 4. Conclusion sur l'humectation des éléments grossiers poreux.

VI. — Humectation d'un sol caillouteux.

6. 1. Cailloux inertes du point de vue hydrique.
6. 2. Cailloux actifs du point de vue hydrique.

III. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine-élément grossier : variations négatives d'humidité

I. — Influence des éléments grossiers non poreux sur la dynamique de l'eau d'un sol en voie de dessèchement.

1. 1. Dispositif expérimental.
1. 2. Résultats.

II. — Transmission d'eau de l'élément rigide au sable.

2. 1. Mise en évidence d'un transfert d'eau sous forme liquide.
2. 2. Quantité d'eau transférée et nature des matériaux grossiers et de la terre.
2. 3. Influence de la texture du matériau d'enrobage sur le transfert d'eau de l'élément grossier au sol.

III. — Influence des éléments grossiers sur la quantité d'eau emmagasinée par le sol.

IV. — Conclusion.

Conclusion

Ann. agron., 1972, **23** (2), 197-239.

EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX (*)

I. — Comportement des éléments grossiers poreux vis-a-vis de l'eau

R. GRAS

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78 - Versailles

RÉSUMÉ

Des matériaux poreux naturels et artificiels sont caractérisés par leurs porosités totale et ouverte et la géométrie de leur espace poral.

Le degré de remplissage par l'eau de leur porosité ouverte est étudié dans plusieurs conditions : humectation rapide, avec précaution, à la pression atmosphérique, sous vide.

A la suite de l'humectation avec précaution, une partie de la porosité ouverte reste occupée par l'air ; la fraction de porosité ouverte pleine d'air est caractéristique de chaque matériau.

L'étude théorique et expérimentale des mécanismes d'emprisonnement d'air montre que celui-ci est d'autant plus intense que l'irrégularité de l'espace poral est plus accentuée.

Comme le rayon maximum des pores constitue un indice de cette irrégularité, on comprend la raison de la régression existant entre le rayon maximal des pores et le volume d'air emprisonné en pour cent de la porosité ouverte.

INTRODUCTION

Les constituants élémentaires du sol sont classés suivant leurs dimensions en terre fine et en fraction grossière. Cette dernière est constituée par les éléments qui ne passent pas à travers un tamis de 2 mm à trous ronds.

(*) Ce travail fait partie d'une thèse de Doctorat d'État soutenue le 21 septembre 1971 à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

Les éléments grossiers du sol passaient habituellement pour un lest inerte qui diluait la quantité de terre fine présente dans l'unité de volume d'un sol en place ; on pensait donc que la présence de cailloux dans le sol devait toujours réduire la croissance des plantes qu'il portait.

Une étude de l'écologie des pêchers dans la Vallée du Rhône a montré que dans cette région l'effet négatif attendu ne se manifestait pas. Le déficit annuel moyen des précipitations sur l'évapotranspiration y est de 250 mm ; la capacité de réserve de la couche de sol exploitée étant dans les meilleurs cas de 130 mm seulement, toute réduction de cette valeur aurait dû se traduire par une diminution de croissance des arbres. Or, on n'a rien constaté de tel lorsqu'on a comparé les arbres poussant sur des sols sableux sans cailloux et ceux qui poussent sur des sols ne différant des précédents que par la présence de 60 p. 100 de cailloux (en masse), ce qui aurait dû se traduire par une réduction de moitié environ de la capacité de réserve en eau du sol.

Il fallait donc admettre que les éléments grossiers intervenaient dans l'alimentation en eau des arbres. On pouvait penser que la présence de cailloux à la surface du sol diminuait le ruissellement et augmentait d'autant la quantité d'eau infiltrée, ou que ces cailloux réduisaient l'évaporation, en se comportant comme une couverture du sol. Ces effets ne paraissaient pas susceptibles d'expliquer seuls l'importance du résultat constaté. Il fallait faire l'hypothèse que les cailloux contribuaient directement à la fourniture d'eau, hypothèse rendue plausible par le fait qu'ils étaient poreux.

Des constatations analogues, faites sur des cailloutis des terrasses du Rhône, des fragments de granite et de schistes altérés, des calcaires des Charentes et la craie du Bassin de Paris, m'ont incité à étudier expérimentalement l'influence des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau du sol.

Un sol contenant des éléments grossiers est un système hétérogène constitué de deux matériaux de propriétés différentes: la terre fine et les éléments grossiers. Les propriétés hydriques d'un tel système découlent d'une part de celles des deux matériaux, d'autre part des échanges d'eau et des équilibres hydriques qui s'établissent entre eux. Il importe donc de connaître d'abord les propriétés hydriques des matériaux grossiers poreux.

Dans cette partie on étudie donc les éléments grossiers poreux rigides, afin de dégager les propriétés qui éclaireront leur comportement dans le système hétérogène terre fine-élément grossier. Comme il s'agit d'élucider les mécanismes de façon à formuler des conclusions de portée générale, on a choisi des matériaux poreux présentant des propriétés fort différentes.

I. — LA POROSITÉ, VALEUR DE RÉFÉRENCE POUR JUGER DE LA TENEUR EN EAU D'UN CORPS POREUX

On peut penser que le volume maximal d'eau que renferme un matériau comportant des vides est identique au volume de ses vides. Ceci revient à admettre que le remplissage des vides par l'eau est total, ce qui n'est pas toujours le cas, comme l'a montré Haines sur un massif de billes de verre (Keen, 1931).

Les procédés utilisés par divers auteurs pour « remplir » la porosité sont très différents : immersion dans l'eau froide ou bouillante, pendant des durées variées, à la pression atmosphérique ou sous vide, etc. Il nous est apparu que les grandes différences entre ces méthodes reflètent le doute de leurs auteurs quant à la possibilité de saturer effectivement le corps poreux. Ces auteurs indiquent rarement d'ailleurs si la saturation est effectivement réalisée.

Comme nous avions besoin d'une valeur de référence pour juger du degré de remplissage de nos milieux poreux par l'eau, nous avons cherché une caractéristique moins sujette à caution que l'humidité d'un corps poreux dit « saturé ».

Ceci nous a amené à considérer le volume des vides existant dans le matériau.

I. I. — *Considérations d'ordre général sur la porosité*

I. II. *La porosité totale.*

C'est le volume des espaces lacunaires contenus dans un volume apparent donné de matériau. Le *volume apparent* est pour un échantillon la somme du volume de solide (*volume réel*) et du volume des espaces lacunaires. Par exemple, si on taille dans de la craie une éprouvette parallélépipédique, le volume apparent sera le volume de ce parallélépipède. En fait, la notion de volume apparent est assez contingente. Dans le cas d'un morceau de meulière grossière, par exemple, le solide comporte à sa surface des trous qu'on peut inclure dans le volume apparent ou exclure de celui-ci. La porosité totale, rapport du volume des pores au volume apparent du matériau, s'exprime en p. 100 du volume apparent.

Comme :

$$\text{Volume apparent} = \text{volume des pores} + \text{volume réel} \tag{1}$$

on a

$$\text{Porosité totale} = \frac{\text{Volume apparent} - \text{Volume réel}}{\text{Volume apparent}} \tag{2}$$

Théoriquement, les mesures sur un échantillon des volumes apparent et réel permettent d'accéder à la porosité. Comme ceci n'est pas toujours facile à réaliser, on cherche à calculer la porosité à partir des masses volumiques réelle et apparente du matériau ; sous réserve que le matériau soit homogène, on peut utiliser des fragments différents pour ces deux déterminations.

Une masse m de matériau a un volume réel v_r, une masse volumique réelle d_r : $d_r = \dfrac{m}{v_r}$ (3)

un volume apparent v_a, une masse volumique apparente d_a : $d_a = \dfrac{m}{v_a}$ (4)

L'équation (2) s'écrit alors en désignant par P la porosité totale

$$P = \frac{m/d_a - m/d_r}{m/d_a} = 1 - \frac{d_a}{d_r}$$

$$P \text{ (p. 100 volume apparent)} = 100 \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right) \tag{5}$$

Les masses volumiques se calculent respectivement à partir des formules (3) et (4).

Le volume réel se mesure soit au pycnomètre à liquide, soit au pycnomètre à air (cf. Annexe 1) sur un échantillon broyé avec suffisamment de finesse, c'est-à-dire lorsqu'un broyage supplémentaire réduisant la taille des grains n'augmente plus la densité obtenue. Le volume apparent est mesuré au pycnomètre à mercure pour les matériaux durs ; pour les autres on taille des éprouvettes de forme géométrique définie, dont on calcule le volume, à partir des dimensions mesurées.

A partir de maintenant, et pour nous conformer à la terminologie en usage dans la science

du sol nous emploierons les termes de densité apparente et de densité réelle, aux lieu et place des termes masse volumique apparente et masse volumique réelle.

1. 12. *La porosité ouverte* (GRAS, 1969).

La définition précédente de la porosité fait intervenir seulement le volume des espaces lacunaires, mais non leur communication éventuelle entre eux ou avec l'extérieur. Si généralement on considère qu'un matériau est poreux lorsqu'on peut passer d'une face de ce matériau à une autre en suivant un espace lacunaire (pore vient du grec poros, passage), on peut concevoir l'existence d'espaces lacunaires sans communication avec l'extérieur. Ces espaces ne jouant aucun rôle dans la rétention des liquides, on voit l'insuffisance de la seule notion de porosité totale. Nous introduisons alors la notion de porosité ouverte : *volume des espaces lacunaires communiquant avec l'extérieur, existant dans un certain volume apparent du matériau.*

Pour mesurer cette porosité, nous recherchons une formule analogue à (1), qui, rappelons-le, donne :

Volume des pores = Volume apparent — Volume réel.

On a, en outre :

Volume des pores = Volume des pores ouverts + Volume des pores fermés (6)

(6) porté dans la relation précédente (1) donne :

Volume des pores ouverts = Volume apparent — (Volume réel + Volume des pores fermés).

En appelant *volume pseudo-réel* la somme du volume réel et du volume des pores fermés, on obtient :

Volume des pores ouverts = Volume apparent — Volume pseudo-réel

Le volume pseudo-réel est le volume déplacé par l'échantillon immergé dans un fluide qui pénétrerait dans toute la porosité ouverte.

Si l'on admet que la masse de gaz contenue éventuellement dans les pores fermés est négligeable par rapport à la masse du matériau, on a, m étant la masse de l'échantillon :

$$\text{Volume apparent } v_a = \frac{m}{d_a}$$

$$\text{Volume pseudo-réel } v_{pr} = \frac{m}{d_{pr}},\ d_{pr} = \text{densité pseudo-réelle}$$

$$\text{Porosité ouverte} = \frac{\text{Volume apparent} - \text{Volume pseudo-réel}}{\text{Volume apparent}}$$

$$= \frac{m/d_a - m/d_{pr}}{m/d_a} = 1 - \frac{d_a}{d_{pr}}.$$

P_0 étant la porosité ouverte, on obtient :

$$P_0 \text{ (p. 100 volume apparent)} = 100 \left(1 - \frac{d_{pr}}{d_a}\right) \qquad (7)$$

P_f étant la porosité fermée, on a, en tenant compte de (6), (5) et (7) :

$$P_f \text{ (p. 100 volume apparent)} = 100\, d_a \left(\frac{1}{d_{pr}} - \frac{1}{d_r}\right)$$

On retrouve que, lorsque $d_r = d_{pr}$, la porosité fermée est nulle.

Le volume pseudo-réel nécessaire au calcul de la densité pseudo-réelle s'obtient en effectuant, à l'aide d'un pycnomètre à air, une mesure de volume sur un échantillon *non broyé*.

I. 13. *Les catégories de cavités constituant la porosité ouverte* (fig. 1).

Parmi les cavités en communication avec l'extérieur, on peut concevoir l'existence des catégories suivantes :

— les canalicules, pores dont les deux extrémités débouchent sur des faces distinctes du solide, ou sur la même face ;

— les pores en doigt de gant ou en cul-de-sac, pores qui n'ont en quelque sorte qu'une extrémité, débouchant sur une face du solide, ou à l'intérieur d'un autre pore.

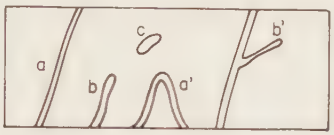


FIG. 1. — *Les différentes catégories de pores*
a : canalicule débouchant sur deux faces de l'élément
a' : canalicule débouchant sur la même face
b : pore en doigt de gant
b' : pore en doigt de gant débouchant sur un canalicule
c : pore fermé

Ces pores auront un comportement différent vis-à-vis des liquides : le canalicule peut théoriquement se remplir complètement, tandis que, pour le pore en doigt de gant, l'emprisonnement d'air rendra le remplissage incomplet.

Ainsi, il est nécessaire de distinguer les catégories de pores, mais les critères à utiliser dépendent du problème étudié, comme le montrent ces quelques exemples :

Si nous nous intéressons à la transmission de l'eau d'une face à l'autre de l'échantillon, ce ne sont pas tous les canalicules qui sont utiles, mais seulement ceux qui permettent de parvenir d'une face à une autre de l'échantillon ; les canalicules dont les deux extrémités débouchent sur la même face sont sans intérêt. Les pores fermés, inutiles tant pour la rétention que pour la transmission des fluides, sont à prendre en considération lorsqu'on envisage la transmission de la chaleur par l'échantillon.

Pour mesurer le volume des canalicules et des doigts de gant on peut tenter d'utiliser le phénomène d'emprisonnement d'air au moment du remplissage par un liquide. En effet :

— l'humectation progressive de l'échantillon par élévation du niveau d'eau remplit théoriquement les canalicules, puisque l'air peut s'échapper par leur parties supérieures. Par contre, l'eau ne pourra guère pénétrer dans les pores en doigt de gant, à cause de l'air qui y est emprisonné. Une humectation progressive à la pression atmosphérique devrait donc remplir seulement les canalicules.

— en opérant sous vide, l'humectation progressive remplira à la fois les canalicules et les pores en doigt de gant.

La différence entre les volumes d'eau absorbés sous vide et à la pression atmosphérique donnerait donc le volume des pores en doigt de gant.

En fait, il peut y avoir, même avec imbibition progressive, un emprisonnement d'air dans certains canalicules. Nous verrons ultérieurement que ceci se produit fréquemment à cause de la géométrie particulière de certains pores et surtout des connexions qui existent entre eux. La différence entre les volumes d'eau absorbés sous vide et à la pression atmosphérique est la somme du volume des pores en doigt de gant et de l'air emprisonné dans les canalicules.

Par ailleurs, les pores en doigt de gant se remplissent un peu à l'air libre, la pénétration de l'eau dépendant de l'équilibre qui s'établit au niveau de l'interface air-eau entre la pression capillaire de l'eau (et éventuellement la pression hydrostatique) et la pression de l'air emprisonné. Pour les raisons précédentes, nous n'avons pas tenté de mesurer le volume des pores en doigt de gant.

1. 14. *Caractéristiques morphologiques et dimensionnelles de la porosité.*

Elles constituent ce qu'on appelle la *porométrie* (*).

La morphologie des pores est en toute rigueur susceptible seulement d'une description après examen à des grossissements adaptés à la taille des pores considérés : examen direct à l'œil nu, à la loupe binoculaire, examen de plaques minces au microscope optique. On peut aussi se faire une idée de la constitution du milieu poreux en examinant une surface de fracture du matériau au microscope électronique à balayage qui permet de voir le relief.

Les dimensions réelles des pores ne peuvent être déterminées que par un examen direct. Comme la section d'un pore, par exemple, n'est pas une figure géométrique simple, il est nécessaire de disposer de plusieurs mesures pour le décrire convenablement. On cherche alors à caractériser un pore par un nombre réduit de dimensions (par exemple, longueur et diamètre). Ceci revient à assimiler l'espace poral à une juxtaposition de volumes géométriques simples (cylindres, par exemple).

La notion de rayon équivalent permet de caractériser les dimensions transversales des pores par un paramètre unique. Pour calculer ce rayon équivalent, on peut avoir recours à des considérations géométriques : le rayon équivalent est alors le rayon du cercle ayant la même surface que la section du pore réel.

On peut aussi avoir recours à un phénomène physique. Si l'on se place, par exemple, du point de vue de la pression capillaire p existant au niveau de l'interface air-eau dans un pore, le rayon équivalent se calcule par la loi de Laplace.

$$p = \frac{2\ T_{EA} \cos \theta}{r},$$

p étant la pression capillaire existant dans le pore réel et r le rayon du capillaire cylindrique équivalent dans lequel la pression capillaire serait p ; T_{EA} est la tension interfaciale eau air ou tension superficielle de l'eau et θ l'angle de raccordement eau-solide. Par des considérations hydrodynamiques, on définirait de même un rayon hydraulique moyen. On conçoit facilement que l'on n'obtienne pas, pour un pore donné, la même valeur du rayon équivalent selon le principe de calcul et la méthode de mesure utilisés.

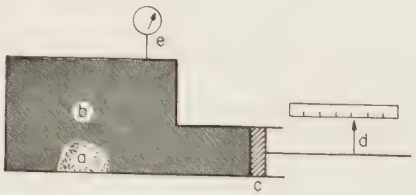


Fig. 2. — *Injection de mercure*

a : corps poreux
b : mercure
c : piston
d : mesure du volume de l'enceinte
e : mesure de pression

Nous avons défini ici le rayon équivalent des pores au moyen de la formule de Laplace, en utilisant l'injection de mercure. Elle consiste à forcer le mercure, liquide non mouillant, à pénétrer dans les pores. A cet effet, l'échantillon est placé dans une enceinte, dans laquelle on fait le vide, avant d'introduire le mercure. On augmente progressivement la pression appliquée au mercure, en notant la diminution de volume correspondante (fig. 2). Au fur et à mesure que la pression

(*) D'après l'Académie des Sciences (t. 264 de 1967), la porométrie est la mesure des formes ou des dimensions des pores d'un matériau ; la porosimétrie est la mesure de la répartition des pores dans un matériau.

augmente, le mercure envahit des pores de diamètre de plus en plus petits. On obtient donc une courbe volume des pores pression appliquée : on passe de la pression appliquée au rayon équivalent par la loi de Laplace : $p = -2\ T \cos\theta / r$ avec T : tension interfaciale vide mercure, θ : angle de raccordement mercure matériau. Ici, on a pris T : 480 dynes·cm et θ : 140°.

Cette méthode ne permet pas de mesurer les rayons des pores larges, ceux-ci étant spontanément envahis par le mercure du seul fait de la pression hydrostatique : par exemple, dans le vide, les pores de 500 μ placés à 1 cm de la surface libre du mercure sont remplis. La courbe « volume occupé par le mercure-rayon équivalent des pores » est donc construite en prenant pour volume maximal des vides, la fraction du volume poral qui n'est pas envahie par le mercure au début de l'opération. Cette courbe n'est donc complète que pour les matériaux ayant des pores suffisamment étroits, on calcule que la valeur limite du rayon est de l'ordre de 25 μ.

Remarquons aussi que du fait de l'épaisseur de l'échantillon, la pression est plus élevée à sa base qu'à son sommet : le mercure pénétrera donc dans des pores d'autant plus étroits que leurs ouvertures seront plus proches de la base de l'échantillon. Une pression telle que les pores de 20 μ soient envahis au sommet de l'échantillon, sera augmentée 2 cm plus bas de 13,6 × 2 g/cm², ce qui correspond à un rayon de 18,5 μ.

Comme pour un milieu donné les pores ont des dimensions différentes, il faut considérer une courbe de répartition des rayons équivalents. Appliquons au mercure des pressions successives croissantes $p_1\ p_1, \ldots\ p_i \ldots$ A la pression p_i, tous les capillaires dont le rayon équivalent est supérieur à r_i $\left(\text{tel que } p_i = \dfrac{2\ T \cos\theta}{r_i}\right)$ sont remplis ; en appliquant la pression supérieure p_{i+1}, on fera pénétrer un volume de mercure correspondant à celui des capillaires de rayon équivalent compris entre r_i et r_{i+1}. En portant sur un graphique la quantité de mercure qui a pénétré dans l'échantillon et le rayon correspondant, on obtient une *courbe cumulative de répartition des volumes des pores ouverts* (fig. 3). On peut exprimer le volume de mercure en p. 100 de la porosité ouverte de

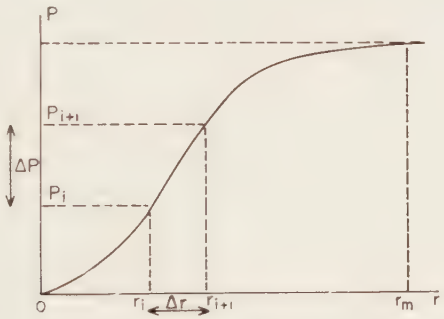


FIG. 3. — *Courbe cumulative théorique de répartition des pores*
P : porosité ouverte
r : rayon équivalent

l'échantillon : l'ordonnée d'un point de la courbe d'abscisse r donne le p. 100 de la porosité due aux pores de rayons équivalents inférieurs à r. Le rayon équivalent maximal est l'abscisse de la courbe cumulative correspondant à 100 p. 100 de la porosité ouverte. A l'intervalle de rayon Δr correspond l'intervalle de porosité ΔP. La porosité due aux pores de rayon compris entre 0 et r est $\Sigma_0^r \Delta P$ ou à la limite $\int_0^r dP = \int_0^r f(r)\ dr$. *La courbe de répartition* proprement dite sera $\dfrac{dP}{dr} = f(r)$; pour chaque valeur r de l'abscisse, son ordonnée est la pente $\dfrac{dP}{dr}$ de la courbe cumulative.

La prise en considération du rayon équivalent permet, par une simplification de la réalité, d'accéder à un paramètre permettant de comparer des dimensions, du moins lorsque les configurations de la porosité ne sont pas trop différentes d'un matériau à l'autre.

1. 2. — *Caractéristiques de la porosité des matériaux étudiés*

Les matériaux grossiers poreux ont été choisis en raison de leurs propriétés différentes :

— Matériaux artificiels :
- verre mousse (*)
- brique réfractaire
- verre fritté n° 3
- verre fritté n° 4
- verre fritté n° 5
- porcelaine
- brique
- massifs de billes de verre agglomérées par chauffage jusqu'au début de fusion.

— Matériaux naturels :
- pierre ponce
- calcaire à milioles
- craie
- lave andésitique
- pouzzolane.

Les valeurs moyennes obtenues pour les densités apparentes et réelles sont données dans le tableau 1. Dans le tableau 2, on indique les valeurs des porosités et du rayon maximum des pores.

TABLEAU I

Densités apparentes et réelles des matériaux

Matériau	Densité apparente	Densité réelle
Verre mousse	0,41	2,53
Pouzzolane	1,12	3,35
Brique réfractaire	1,17	2,76
Verre fritté n° 4	1,28	2,24
Porcelaine	1,56	3,05
Verre fritté n° 3	1,58	2,22
Craie	1,59	2,73
Calcaire à milioles	1,61	2,74
Verre fritté n° 5	1,62	2,29
Brique	1,70	2,71
Billes de verre :		
50- 63 μ	1,76	2,98
100- 125 μ	1,81	2,82
200- 225 μ	1,67	2,67
400- 500 μ	1,77	2,68
1 000-1 250 μ	1,70	2,67
Lave andésitique	2,24	2,80

(*) Obligeamment fourni par la Compagnie Saint-Gobain.

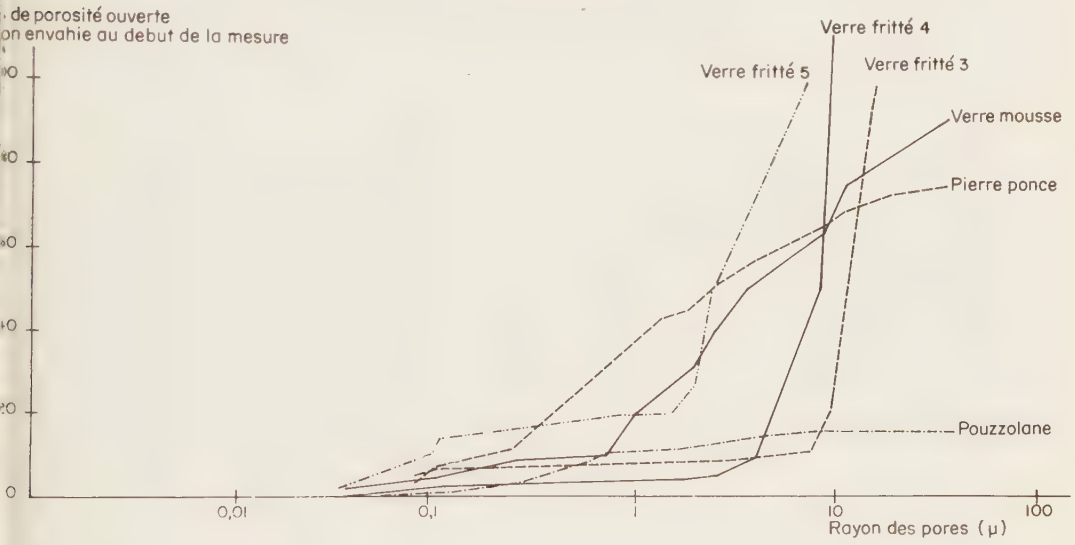
Les courbes cumulatives de répartition des rayons des pores ont été déterminées par injection de mercure (fig. 4). Ces courbes sont incomplètes pour les matériaux dont les pores ont des rayons supérieurs à 25 μ : calcaire à milioles, brique réfractaire, lave andésitique, pierre ponce, verre mousse, pouzzolane, massif de billes de verre.

On a alors tenté de caractériser tous les matériaux par le « rayon maximal des pores » (tabl. 2), qui est ainsi défini :

— rayon équivalent maximal des pores mesurés sur la courbe cumulative de répartition obtenue par injection de mercure, pour les matériaux à pores étroits ($r < 25\ \mu$),

— rayon des billes de verre,

— demi-dimension maximale transversale des pores pour les matériaux autres que les précédents. Cette dimension a été évaluée par observation à la loupe binoculaire munie d'une échelle



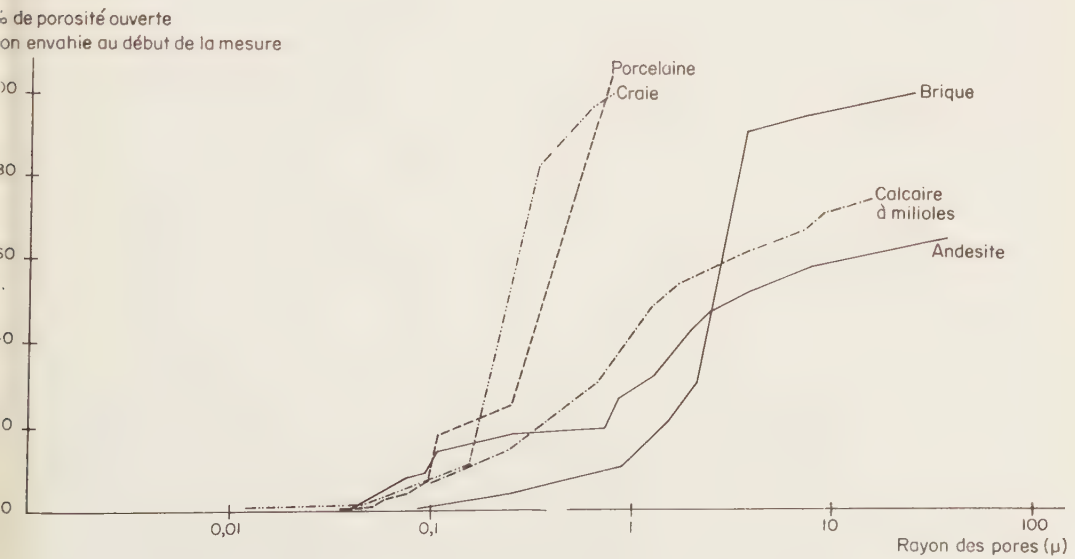


FIG. 4. — *Courbes cumulatives de répartition des pores*

micrométrique en éliminant les cavités de dimension transversale supérieure à 2 mm. On a vérifié pour le verre mousse et la pierre ponce pourvus d'une porosité fermée que les gros pores n'étaient pas tous fermés: lorsqu'on recouvre quelques-uns de ces gros pores par une goutte d'eau, celle-ci disparaît absorbée par les canalicules débouchant dans ces gros pores.

TABLEAU 2

Caractéristiques de la porosité des divers matériaux

Matériaux	Porosité totale (% volume apparent)	Porosité ouverte (% volume apparent)	Rayon maximal des pores (μ)
Porcelaine	48,6	48,6	0,7
Craie *a*	43,6	43,6	0,8
Craie *b*	43,6	43,6	
Verre fritté n° 5	31,8	31,8	7,2
Verre fritté n° 4	42,7	42,7	9,0
Verre fritté n° 3	28,9	28,6	15,9
Brique *a*	37,0	36,4	24,5
Brique *b*	36,6	35,3	
Brique *c*	37,0	36,0	
Calcaire à milioles *a*	40,9	40,9	250
Calcaire à milioles *b*	41,7	41,6	
Brique réfractaire *a*	57,3	55,9	250
Brique réfractaire *b*	57,7	57,2	
Brique réfractaire *c*	57,7	56,4	
Lave andésitique	19,6	19,6	500
Pierre ponce	75,0	69,5	500
Verre mousse *a*	84,2	75,4	500
Verre mousse *b*	83,4	71,7	
Verre mousse *c*	83,4	72,9	
Pouzzolane	66,5	64,7	1 000
Billes de verre 50- 63 μ	36,6	36,6	50
Billes de verre 100- 125 μ	35,8	35,8	100
Billes de verre 200- 225 μ	36,3	36,3	200
Billes de verre 400- 500 μ	34,2	34,2	400
Billes de verre 1 000-1 250 μ	36,0	36,0	1 000

Pour les matériaux à pores larges, la différence entre le volume de la porosité ouverte et le volume qui n'est pas envahi par le mercure au début de la mesure, est importante pour la pouzzolane et moindre pour la pierre ponce, le verre mousse, l'andésite et le calcaire à milioles. Pour ces derniers matériaux, on est surpris du faible volume représenté par les gros pores, compte tenu de leur aspect : les différences entre l'ordonnée maximale des courbes cumulatives et la porosité ouverte sont très faibles, ce qui tendrait à indiquer que les gros pores représentent un faible volume. Il faut faire intervenir un phénomène signalé par Fatt (1956) : lorsque de gros pores

communiquent avec l'extérieur par l'intermédiaire de petits pores, ces gros pores ne sont remplis que lorsque la pression du mercure atteint la pression d'entrée dans les petits pores ; le volume de ces gros pores est donc mesuré avec celui des petits.

II. — HUMECTATION DIRECTE PAR L'EAU

Nous allons humecter maintenant les éléments poreux, en les mettant directement au contact de l'eau libre, de façon à faire apparaître leurs caractéristiques propres. Celles-ci éclaireront éventuellement leur comportement, lorsque l'humectation se fera par l'intermédiaire du milieu meuble. Avant de faire cette étude, nous examinerons les problèmes posés par les mesures d'humidité.

2. 1. — *Critique de la mesure d'humidité*

On a caractérisé l'humidité par dessiccation à l'étuve, ce qui du point de vue de la mesure ne présente pas de difficulté. Mais pour effectuer cette mesure, il faut retirer l'échantillon de l'eau. On peut se demander si, au moment de ce retrait, on ne risque pas de perdre de l'eau qui s'échapperait des pores de grandes dimensions par ressuyage spontané. Ceci nous a conduit à étudier ce problème sur les massifs de billes de verre. Ces massifs ont été immergés dans un récipient d'eau et on a vérifié que leur remplissage était total puisque ces massifs déplaçaient un volume d'eau égal et non supérieur à leur volume réel. Une fois ces échantillons retirés de l'eau, la mesure pondérale de leur humidité a mis en évidence un ressuyage spontané, d'autant plus important que le rayon des billes (et donc des pores) est plus grand (tabl. 3).

TABLEAU 3

Ressuyage spontané de massifs de billes de verre à la sortie de l'eau

Rayon des billes (μ) (valeurs extrêmes)	Degré de remplissage (volume d'eau retenue rapporté au volume des vides et exprimé en p. 100)
25-31	92,4
50-62	95,3
100-112	84,5
200-230	76,9
500-625	58,9

Il existe une liaison négative significative au seuil 5 p. 100 entre le degré de remplissage G (volume d'eau retenu exprimé en pour cent du volume des pores ouverts) et le rayon moyen des billes c (μ).

$$G = -0{,}065\ c + 94{,}19$$

Cette régression s'interprète facilement en admettant que la pression capillaire intervient dans la rétention de l'eau, puisque cette pression est d'autant plus faible

que le rayon des pores est plus grand. On peut donc s'attendre à ce que, lors du retrait de l'échantillon de l'eau, une partie de celle-ci s'écoule par gravité des échantillons à gros pores.

La vidange spontanée des gros pores est donc appréciable pour les billes de verres : par exemple, pour le massif ayant des pores de dimensions transversales maximales 500 μ, 60 p. 100 de la porosité seulement restent occupés par l'eau, au moment de la pesée de l'échantillon.

Cette perte d'eau est beaucoup moins importante pour les autres matériaux naturels ou artificiels qui ont été étudiés, puisqu'on mesure souvent, pour des échantillons ayant des pores de diamètre 100 μ, un degré de saturation de la porosité supérieur à 80 p. 100. Nous vérifierons ultérieurement que la perte d'eau est effectivement faible pour ces échantillons.

Nous avons donc continué à doser l'humidité par voie pondérale après dessiccation à l'étuve.

Pour juger du degré de remplissage de la porosité par l'eau, on a rapporté l'humidité à la porosité. Comme l'humidité H (en p. 100 du poids sec) est le volume d'eau (cm^3) existant dans 100 g de matériau occupant le volume apparent $100 \cdot d_a^{-1}$ (poids = volume apparent $\cdot$ d_a^{-1}), on a :

$$\text{Humidité (p. 100 volume apparent)} = \frac{\text{humidité (p. 100 poids sec)}}{100 \cdot d_a^{-1}} \cdot 100, \text{ soit :}$$

$$\text{Humidité (p. 100 volume apparent)} = \text{humidité (p. 100 poids sec)} \; d_a$$

2. 2. — *Influence de la pression de l'air et de la durée d'humectation*

Nous avons opéré sur des éléments parallélépipédiques sensiblement de mêmes dimensions (section carrée de 2 à 3 cm de côté, hauteur 4 cm) (*).

2. 21. *Humectation brutale à l'air.*

L'échantillon est placé dans un bécher étroit, qui est rempli brutalement en versant l'eau sur l'échantillon. On se place ainsi dans des conditions très défavorables au point de vue de la sortie de l'air de l'échantillon, puisqu'il est environné d'eau sur toutes ses faces, presque immédiatement.

On constate alors un dégagement gazeux plus ou moins intense ou long suivant les échantillons. Pour ceux dont le dégagement gazeux est faible, le dosage de l'humidité 48 heures après l'immersion montre qu'une faible fraction de la porosité ouverte est occupée, et donc qu'il y a un emprisonnement d'air considérable. *Pour tous les échantillons*, il y a, lors de l'humectation, une phase *emprisonnement d'air*, l'air étant considéré comme emprisonné lorsqu'un volume d'air est séparé de l'atmosphère par une paroi solide ou liquide.

Cette phase est suivie d'une *expulsion de l'air* emprisonné, et c'est la teneur en air à l'issue de cette phase qui permet de classer les matériaux :

— pour la brique et la craie, par exemple, la quasi-totalité de l'air est expulsée en quelques minutes environ et le remplissage de la porosité ouverte est presque complet. L'emprisonnement d'air est un épisode de courte durée ;

(*) Les échantillons d'andésite et de pouzzolane n'ont pas été façonnés en forme de parallélépipède.

— pour d'autres matériaux, l'expulsion de l'air est faible et, de ce fait, la quantité d'air emprisonné lors de la phase initiale diminue peu.

En définitive, il y a toujours initialement emprisonnement d'air, mais son expulsion est plus ou moins complète selon le matériau.

La première colonne du tableau 4 permet de comparer les remplissages obtenus après 48 heures de séjour dans l'eau.

2. 22. *Humectation à l'air avec précaution pendant 48 heures.*

Les échantillons sont placés à plat dans un récipient dans lequel on élève progressivement le niveau de l'eau, l'élément étant submergé au bout de 6 heures. On mesure l'humidité de l'échantillon 48 heures après la submersion totale. Presque pour tous les échantillons, l'humidité est plus élevée que celle des cas précédents (tabl. 4).

Cette amélioration tient à ce que la quantité d'air emprisonnée initialement est plus petite, celui-ci pouvant s'échapper par la partie supérieure de l'échantillon non encore immergé.

2. 23. *Humectation sous vide avec précaution pendant 48 heures.*

On a cherché à obtenir un remplissage aussi complet que possible en utilisant un récipient étanche ainsi aménagé (fig. 5) : à quelque distance du fond est placée une plaque de porcelaine poreuse, sur laquelle on dispose l'échantillon. Trois tubulures existent : l'une pour faire le vide, l'autre pour l'amenée d'eau et la troisième pour le branchement d'un manomètre à mercure.

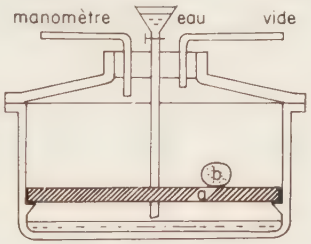


Fig. 5. — *Appareil pour humectation sous vide*
a : plaque poreuse *b* : corps poreux à humecter

L'humectation se déroule de la façon suivante :

— l'échantillon étant placé dans l'enceinte, on y fait le vide pendant 4 heures ;

— de l'eau dégazée est ensuite introduite dans l'enceinte de façon à obtenir une atmosphère humide. L'échantillon est maintenu ainsi pendant 15 heures environ ;

— le niveau d'eau est élevé progressivement. Lorsque ce niveau atteint la plaque poreuse, l'élément est humecté par capillarité, puis submergé. Entre le début de l'humectation par capillarité et la submersion s'écoulent environ 6 heures ;

— l'échantillon reste submergé pendant 24 heures, le vide étant maintenu.

Une plus grande fraction de la porosité ouverte est ainsi remplie, au moins 95 p. 100, sauf pour le calcaire à milioles (92,5 p. 100), le verre fritté n° 4 (80 p. 100) et le verre mousse (70 p. 100) ; cependant, avec ce dernier matériau, la reproductibilité est mauvaise et on atteint parfois 95 p. 100.

TABLEAU 4

Humidité des éléments

exprimée en p. 100 du volume apparent (nombre de gauche)
et en p. 100 de la porosité ouverte (nombre de droite italique)

Matériaux	Humectation à l'air						Humectation sous vide			
	Brutale immersion 48 heures		Avec précaution, immersion 48 heures		Avec précaution, immersion 30 jours		Avec précaution, immersion 48 heures		Avec précaution, immersion 30 jours	
Porcelaine	42,7	*87,8*	45,9	*92,4*	46,6	*95,9*	46,6	*95,8*	46,5	*95,6*
Craie *a*	39,4	*90,3*	41,3	*94,7*	—		41,7	*95,6*	—	
Craie *b*	42,4	*97,2*	44,4	*100*	45,9	*100*	43,6	*100*	441,	*100*
Verre fritté n° 4			38,4	*89,9*	39,2	*91,8*	37,3	*87,3*	39,1	*91,5*
Verre fritté n° 3			25,4	*88,8*	27,9	*97,5*				
Brique *a*			32,8	*90,1*			34,9	*95,9*		
Brique *b*	30,0	*84,9*	33,1	*93* ,	35,2	*99,7*	35,0	*99,1*	35,1	*99,4*
Brique *c*	29,5	*31,9*	32,9	*91,4*	—		34,8	*96,6*		
Calcaire à milioles *a*	11,0	*26,8*	13,9	*33,9*	—		37,2	*90,9*		
Calcaire à milioles *b*	12,2	*29,3*	14,2	*34,1*	20,2	*48,5*	38,5	*92,5*	38,8	*93,3*
Brique réfractaire *a*	39,6	*71,5*	43,6	*78,0*	—		48,4	*86,6*	—	
Brique réfractaire *b*	39,5	*69,0*	44,5	*77,8*	—		49,8	*87,0*	—	
Brique réfractaire *c*	39,6	*70,2*	34,9	*77,8*	49,1	*87,0*	49,8	*88,3*	49,8	*88,3*
Lave andésitique	7,5	*38,2*	10,1	*51,5*	14,3	*72,9*	19,0	*96,9*	20,4	*100*
Pierre ponce	23,1	*33,2*	30,8	44,3	30,4	58,1	63,1	90,7	62,3	89,6
Verre mousse *a*	4,4	*5,8*	22,8	*30,2*	23,60	*31,3*	59,6	*79,0*	72,6	*96,2*
Verre mousse *b*	8,4	*11,7*	10,6	*14,7*	15,00	*20,9*	37,6	*52,4*		
Verre mousse *c*	9,7	*13,3*	—		—					

Cette façon de procéder permet de remplir théoriquement la quasi-totalité de la porosité ouverte, qu'il s'agisse de canalicules ou de doigts de gants.

Certaines manipulations précédentes ont été reprises en augmentant leur durée ; nous allons examiner leurs résultats

2. 24. *Humectation à l'air avec précaution pendant 30 jours.*

On opère comme en 2. 22, mais en pesant l'élément tous les 7 jours. Pour presque tous les éléments, l'humidité a d'abord augmenté pour atteindre un palier par la suite. Les différences entre l'humidité au bout de 2 jours et de 30 jours sont surtout sensibles pour le verre mousse et la pierre ponce. Certains éléments comme le verre mousse n'atteignent pas de palier au bout de 49 jours.

2. 25. *Humectation sous vide avec précaution pendant 30 jours.*

Lorsque la durée passe de 2 à 30 jours, la quantité d'eau absorbée n'augmente que pour le verre mousse. L'humectation sous vide avec précaution pendant 48 heures permet donc d'obtenir à un remplissage caractéristique de l'élément poreux dans la quasi-totalité des cas.

2. 26. *Emprisonnement d'air, durée de submersion et variations de température.*

Dans l'expérience d'humectation à l'air avec précaution, on a constaté que, pour certains éléments comme le verre mousse, l'équilibre n'était pas atteint au bout de 49 jours. Dans cette expérience, les éléments étaient retirés de l'eau tous les 7 jours pour mesurer leur humidité.

Nous avons repris l'expérience précédente pour le verre mousse, mais en modifiant les conditions expérimentales. On place une cuve à dégagement au-dessus de l'échantillon (fig. 6), de façon à suivre le dégagement gazeux en fonction du temps,

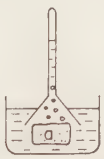


FIG. 6. — *Étude de l'expulsion d'air*
a : corps poreux

sauf tout à fait au début. L'ensemble est placé dans un bac maintenu à la température constante de 30°C par un élément de chauffage à thermostat. Le dégagement gazeux est suivi par visée au cathétomètre du niveau d'eau dans le tube : ce niveau ne variait plus au bout de 6 jours environ. Ceci est en contradiction avec les résultats de l'expérience de submersion de 49 jours, pour deux raisons : la quantité d'air expulsée est beaucoup plus faible dans l'expérience isotherme et l'équilibre est atteint beaucoup plus rapidement.

On a alors modifié ainsi l'expérience : le chauffage du bac a été arrêté de temps à autre, ce qui amenait une diminution de la température de l'eau jusqu'à 26 ou 21° selon les cas ; la remise en route du chauffage élevait la température à 30°C. Au cours du réchauffement de l'eau, on observait un dégagement gazeux important (1/10 à 5/10 de cm^3) et ce phénomène s'est reproduit chaque fois qu'on a répété cette

opération, l'expérience ayant duré 27 jours et le dégagement total étant de 3,5 cm^3. Comme à aucun moment la température n'a dépassé 30°C, ce n'est pas la dilatation des bulles qui a facilité leur expulsion, mais plutôt les variations de volume qui ont provoqué leur décrochement des aspérités des pores.

Dans l'expérience non isotherme décrite en 2. 24, le fait de retirer les échantillons de l'eau produisait une diminution de la pression hydrostatique lors du retrait et une augmentation lors de l'immersion, qui devaient certainement entraîner une variation de volume des bulles facilitant leur expulsion.

Dans le milieu naturel il est probable que le dégazage des corps poreux immergés se poursuit lentement dans le temps, en grande partie à cause des variations de températures.

Il est aussi possible qu'au cours du temps, il y ait une certaine diffusion de l'air des bulles jusqu'à l'atmosphère extérieure. Comme l'air des bulles est comprimé par les actions capillaires, la solubilité de l'air dans l'eau augmente localement. La teneur en air de l'eau a tendance à s'homogénéiser par diffusion, et lorsque le seuil de solubilité est atteint il y a sortie d'air vers l'atmosphère. Ce processus, qui doit cesser lorsque la pression de l'air emprisonné est égale à celle de l'air atmosphérique, ne paraît pas avoir une grande importance, du moins lorsque l'eau est immobile.

2. 27. *Classement des matériaux suivant la façon dont ils se remplissent.*

Les matériaux poreux étudiés peuvent se classer schématiquement en deux groupes. Pour les uns, la porosité ouverte se remplit presque complètement d'eau, quelles que soient les conditions. Les autres ont leur porosité ouverte remplie de façon très incomplète. Comme l'humectation sous vide améliore en général le degré de saturation, c'est bien la quantité d'air emprisonné qui est différente dans ces deux groupes de matériaux.

L'humectation brutale des matériaux a permis de montrer que l'emprisonnement d'air définitif résultait de deux processus successifs :

— emprisonnement d'air initial : à son terme, il existe dans le volume poral des bulles d'air sans communication avec l'atmosphère. Cette phase existe pour tous les matériaux ;

— expulsion plus ou moins complète de l'air emprisonné au cours de la phase précédente. C'est la deuxième phase qui permet de classer en première approximation les matériaux en deux groupes. Pour les uns, l'expulsion de l'air quasi instantanée provoque un remplissage presque total de l'échantillon. Dans le cas des autres, l'expulsion d'air est beaucoup moins intense et aboutit à un remplissage très incomplet. L'expulsion d'air peut être facilitée par des variations de température.

III. — ÉTUDE PARTICULIÈRE DE L'EMPRISONNEMENT D'AIR

Maintenant que nous venons de montrer l'importance des mécanismes régissant l'emprisonnement d'air sur le remplissage incomplet de certains matériaux, nous allons étudier plus particulièrement ce phénomène dans des conditions se rapprochant de celles du milieu naturel : l'humectation à la pression atmosphérique avec précaution.

3. 1. — *Explication des différences d'emprisonnement d'air entre les matériaux*

Quoique la perte d'eau par ressuyage spontané des gros pores semble assez faible (section 2. 1), nous avons évalué ici le degré de remplissage de la porosité sans sortir l'échantillon de l'eau.

A cet effet, on place l'échantillon sec dans un pycnomètre à large ouverture, dit de Hobarth, dont on connaît le volume. On compare le volume du récipient à la somme « volume réel de l'échantillon + volume de l'eau utilisée pour remplir le récipient contenant l'échantillon ».

L'égalité : volume du pycnomètre = volume réel de l'échantillon + volume de l'air emprisonné + volume d'eau ajoutée, permet d'accéder au volume d'air emprisonné, les autres quantités étant connues par pesée.

L'humectation des échantillons a été réalisée avec précaution de façon à limiter le plus possible l'emprisonnement d'air : on a élevé progressivement le niveau de l'eau de façon à provoquer la submersion au bout de 6 heures. Les mesures ont été effectuées 7 heures après le début de l'humectation.

Le volume d'air emprisonné a été rapporté à la porosité ouverte de chaque matériau. On obtient ainsi le volume d'air emprisonné en p. 100 du volume des vides en communication avec l'extérieur. Les mesures ont été répétées plusieurs fois et on a constaté que l'emprisonnement d'air est caractéristique de chaque matériau.

Ces matériaux se classent en deux catégories :

— ceux qui se remplissent complètement : les massifs de billes de verre ;

— les autres, pour lequel le volume d'air emprisonné varie entre 8,6 et 82 p.100 de la porosité ouverte (12 échantillons).

Pour tenter d'expliquer les différences existant dans le second groupe, on a considéré les différences de mouillabilité et de rayon des pores.

3. 11. *Mouillabilité.*

L'angle de raccordement θ solide eau permet de caractériser la mouillabilité. Il est nul dans le cas de la mouillabilité parfaite, c'est-à-dire lorsque le liquide s'étale complètement sur le solide. Dans les autres cas, cet angle peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 180°.

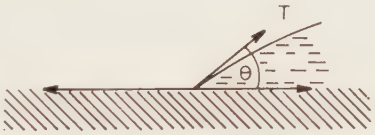


FIG. 7. — *Angle de raccordement solide liquide*

L'étude de l'équilibre du bord d'une goutte d'eau sous l'influence des tensions interfaciales solide air T_{SA}, solide eau T_{SE} et eau air T_{EA} ($T_{SA} = T_{SE} + T_{EA} \cos \theta$) conduit à considérer le cosinus de cet angle de raccordement.

$$\cos \theta = (T_{SA} - T_{SE})/T_{EA} = W_{SE}/T_{EA} \qquad \text{(fig. 7)}$$

Ce cosinus est le quotient de l'énergie d'adhésion solide liquide W_{SE} (travail nécessaire pour transformer l'unité d'aire d'interface solide air en interface solide liquide) par la tension interfaciale eau air ou tension superficielle du liquide.

Lorqu'on veut mesurer cet angle de raccordement, une première difficulté provient du fait que la surface solide est rarement plane, d'où la prise en considération d'un angle apparent de raccordement θ' (fig. 8). Wenzel (1936), en introduisant la notion de rugosité macroscopique

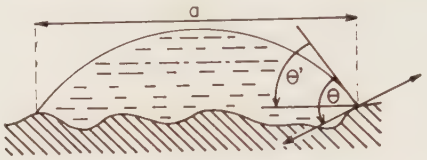


Fig. 8. — *Angle de raccordement réel* θ *et apparent* θ'
a : trace de l'aire apparente

(rapport entre l'aire réelle du solide et l'aire apparente de son envelope), a donné la relation liant θ et θ' : $\cos \theta' = r \cos \theta$. Elle entraîne pour

$$\theta < 90^\circ \qquad \theta' < \theta$$
$$\theta > 90^\circ \qquad \theta' > \theta$$

Si la hauteur des aspérités de la surface augmente, il peut y avoir occlusion d'air et la relation entre θ et θ' fait alors intervenir l'aire f_1 de l'interface solide liquide et l'aire f_2 de l'interface liquide air (fig. 9) :

$$\cos \theta' = f_1 \cdot \cos \theta - f_2$$

Cette formule fut établie par Cassie et Baxter (1944) pour des réseaux de fibres textiles dans un cas où la mouillabilité était faible. Cette formule n'est donc pas utilisable dans le cas de corps poreux pour lesquels l'eau pénètre dans les pores aboutissant à la surface, ce qui est notre cas. Par ailleurs, lorsqu'on dépose à la surface d'un corps poreux une goutte d'eau, elle disparaît si le corps a une certaine mouillabilité et toute mesure est de ce fait impossible. Nous avons tourné

Fig. 9. — *Cas complexe : interfaces eau solide et eau air*

cette difficulté en injectant une bulle d'air sous une face de l'échantillon immergé (fig. 10) ; la projection sur un écran de l'image de la bulle permet de mesurer un angle de raccordement. Mais comme l'eau a pénétré dans les pores, la formule de Cassie et Baxter n'est plus utilisable. L'attitude qui a été enfin adoptée revient à mesurer un certain angle de raccordement dans des conditions particulières, en espérant qu'il est en corrélation avec l'angle réel. Le cosinus de cet angle de raccordement constitue donc seulement un indice de mouillabilité. Il varie entre 0,72 et 0,96 pour les matériaux étudiés ici.

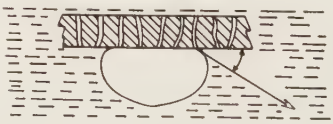


Fig. 10. — *Mesure d'un angle de raccordement par la méthode de la bulle*

Conjointement, en s'inspirant d'une méthode de Turc, nous avons essayé d'accéder à la mouillabilité de la matière elle-même. Pour cela, on a examiné le franchissement de l'interface air eau par le matériau réduit en poudre passant à travers un tamis de 50 μ. Chaque particule est soumise à son poids apparent (différence entre son poids et la poussée d'Archimède) et à la résultante des

forces superficielles appliquées le long du périmètre de raccordement solide liquide (fig. 11). Les particules des corps mouillables pénètrent dans le liquide, tandis que celles des corps peu mouillables restent à la surface. Pour les matériaux étudiés, on n'a pas constaté de différences aussi tranchées, mais des durées différentes pour que la totalité de la poudre franchisse l'interface. Finalement, on a mesuré la masse de poudre qui a franchi l'interface air eau 15 secondes après le dépôt sur cet interface. L'indice de mouillabilité, rapport de cette quantité à la quantité totale apportée, varie de 8 à 86 p. 100.

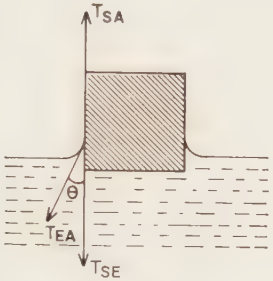


FIG. 11. — *Particule en équilibre à l'interface air eau*

3. 12. *Rayon maximum des pores.*

Comme nous l'avons déjà vu, chaque matériau ne peut se caractériser par un diamètre de pore, mais par une courbe de répartition de ces diamètres. Si cette courbe de répartition était normale, on pourrait utiliser la moyenne comme paramètre caractéristique ; en fait, il en est rarement ainsi, les courbes étant souvent plurimodales. Par ailleurs, pour les matériaux ayant des pores larges, la partie de la courbe de répartition relative à ces pores n'est pas connue. Aussi avons-nous finalement pris comme indice le rayon maximal des pores précédemment défini (section 1. 2).

3. 13. *Liaison degré d'emprisonnement d'air rayon maximal des pores.*

L'examen des graphiques représentant le degré d'emprisonnement d'air en fonction du rayon maximal des pores et des indices de mouillabilité pour les 12 échantillons montre l'existence d'une relation plausible seulement avec le rayon maximal des pores. Cependant, nous avons appliqué l'analyse de variance à deux régressions doubles faisant intervenir comme variables explicatives le rayon maximal des pores, puis l'un ou l'autre des indices de mouillabilité. Seul le rayon maximal de pores r_m expliquait significativement ($P < 0{,}1$ p. 100) une partie de la variation du degré d'emprisonnement E :

$$E = 0{,}049\, r_m + 24{,}77$$

Compte tenu de la disposition des points expérimentaux sur le graphique (fig. 12), on a essayé un ajustement logarithmique qui s'est révélé plus adéquat : $P < 0{,}1$ p. 100 :

$$E = 24{,}58 \log r_m - 4{,}79$$

Cette régression explique 84 p. 100 de la variance de E.

Ainsi, pour la population de matériaux étudiés, l'emprisonnement d'air croît avec le diamètre maximal des pores. On tentera ultérieurement d'expliquer ce phénomène.

Le fait que nous n'ayons pu mettre en évidence une influence de la mouillabilité peut tenir au fait que la détermination de l'angle de raccordement vrai d'un matériau comportant des pores n'a pu être faite. Il se peut aussi que la gamme de variation de la mouillabilité soit insuffisante pour mettre en évidence son action ; en effet, pour les matériaux étudiés, l'angle de raccordement θ_i de la bulle immergée est tel que $0{,}72 < \cos \theta_i < 0{,}98$.

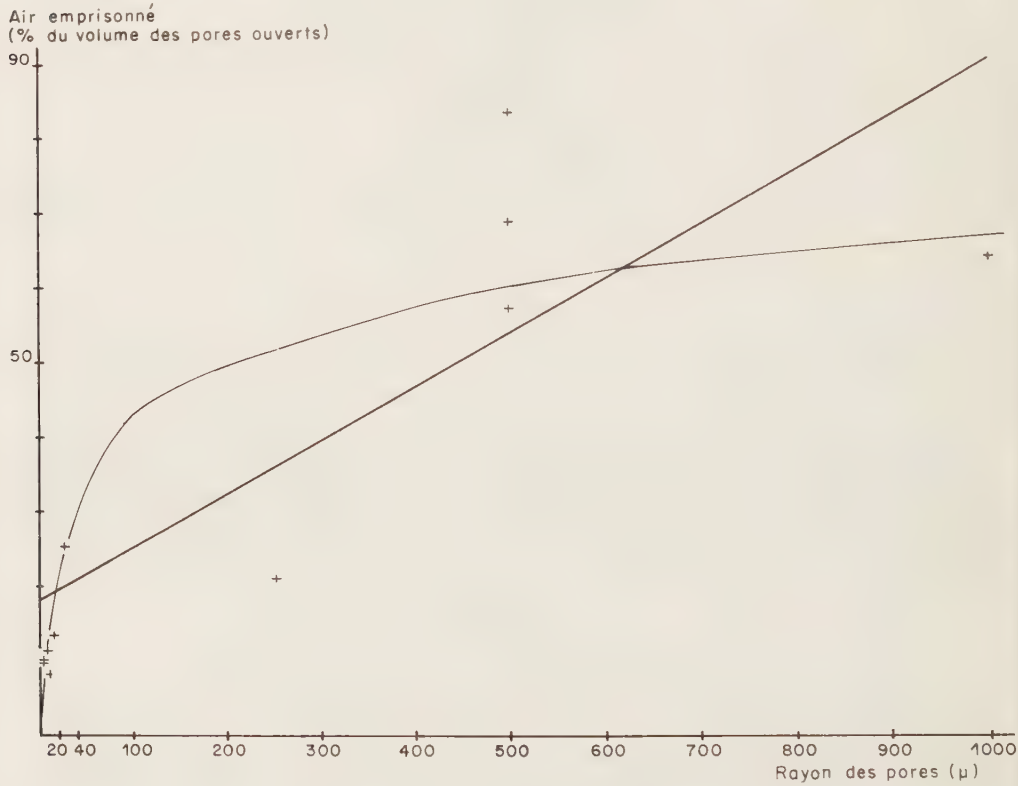


Fig. 12. — *Quantité d'air emprisonné et rayon maximal des pores*

3. 14. *Comparaison de la mesure du volume d'air emprisonné au moyen du pycnomètre et par dessiccation de l'échantillon.*

Une fois évalué le volume d'air emprisonné au moyen de pycnomètres, les échantillons en ont été retirés, puis séchés à l'étuve pour un dosage pondéral de leur humidité. En retranchant le volume d'eau ainsi obtenu du volume des pores ouverts, on obtient une évaluation de l'emprisonnement d'air. Pour comparer les deux façons de mesurer le volume d'air emprisonné, on a construit un graphique (fig. 13) ayant en ordonnée les valeurs mesurées au pycnomètre et en abscisse les valeurs obtenues à partir du dosage pondéral de l'eau. Pour les points représentatifs qui se placent, aux erreurs de mesures près, sur la première bissectrice, il n'y a pas de différence entre les deux mesures.

Sur les 12 échantillons étudiés autres que les billes de verre, 3 ont leurs points représentatifs au-dessus de la première bissectrice, 4 sont très proches de cette bissectrice et 5 au-dessous.

Lorsque les points représentatifs sont au-dessus de la première bissectrice, le dosage pondéral de l'eau sous-évalue le volume d'air emprisonné par rapport à la mesure au pycnomètre. On ne peut fournir d'explication satisfaisante de ce fait.

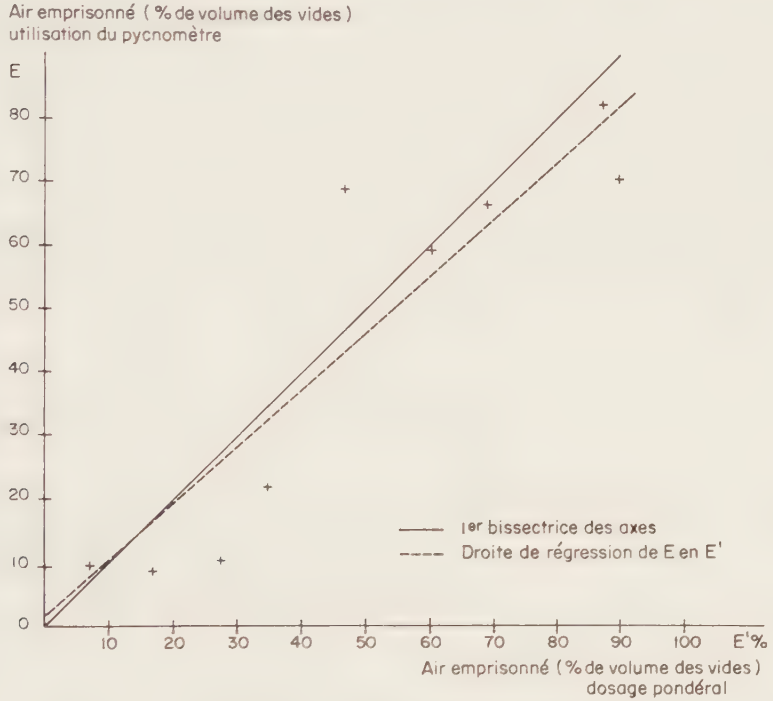


FIG. 13. — *Comparaison de diverses mesures d'emprisonnement d'air*

Les points situés au-dessous de cette bissectrice correspondent aux matériaux pour lesquels le dosage pondéral surévalue l'emprisonnement d'air par rapport à la mesure au pycnomètre. Comme le volume d'air se calcule en retirant le volume d'eau retenue du volume des vides, la différence peut provenir d'une évaluation par défaut du volume d'eau retenue ; on peut invoquer une perte d'eau au moment où l'échantillon est retiré du pycnomètre. Un examen plus approfondi montre que cette perte d'eau serait relativement indépendante du rayon maximal des pores, ce qui est en désaccord avec les constatations faites sur les massifs de billes de verre (section 2. 1). En effet, pour les matériaux à pores larges, certains points sont très au-dessous de la première bissectrice (pouzzolane, brique réfractaire), mais d'autres en sont très voisins (verre mousse, calcaire à milioles, pierre ponce) et un, l'andésite, est même au-dessus. Par contre, des éléments à pores relativement fins (porcelaine, verre fritté n° 4), pour lesquels les pertes d'eau devraient être minimales d'après les modèles de billes de verre, sont au-dessous de cette bissectrice.

Les différences de résultats entre les deux séries de mesures ne proviennent donc

pas uniquement du ressuyage spontané des échantillons à pores larges lorsqu'on les retire de l'eau.

Par ailleurs, les massifs de bille de verre ne se comportent pas de la même façon que les 12 matériaux étudiés ; pour ces derniers, la perte d'eau par ressuyage spontané est assez faible et indépendante du diamètre des pores. L'explication de cette différence de comportement est à rechercher dans la configuration de l'espace poral. Il y a vraisemblablement, pour certains des matériaux étudiés, des pores de grandes dimensions reliés entre eux par des pores de petites dimensions. Dans le cas des billes de verre, les pores présentent encore des variations de section (fig. 14), mais elles sont cependant moins marquées que dans le cas précédent. La perte d'eau par gravité peut alors être proportionnelle au diamètre maximal des pores (ou des billes). Pour les 12 matériaux étudiés, cette perte dépend des diamètres des petits pores mettant en communication les gros pores avec l'extérieur ; les gros pores ne se vident donc que lorsque l'énergie appliquée permet de vider les petits. Il y a là un effet homologue de celui qui a déjà été signalé pour l'injection de mercure. Dans le cas où des gros pores communiquent avec l'extérieur par de petits pores, ce qui se passe dans les gros pores est très lié aux phénomènes existant dans les petits.

Fig. 14. — *Sections des espaces existant entre les billes de verre en arrangement cubique* (d'après Graton et Fraser, 1935)

Les constatations précédentes montrent qu'il est difficile de choisir entre les deux façons de mesurer le volume d'air emprisonné. On peut simplement dire que les mesures sont correctes lorsqu'elles aboutissent à des valeurs sensiblement analogues. Cela est vrai en moyenne, puisqu'il existe une liaison étroite entre la mesure d'air emprisonné au pycnomètre E et la même mesure effectuée par dessiccation E′ :

$$E = 0{,}896\ E' + 1{,}681 \qquad (P < 0{,}1\ \text{p. } 100)$$

La liaison de E avec E′ explique 94,7 p. 100 de la variation de E.

3. 2. — *Essai d'interprétation des constatations expérimentales*

Nous venons de voir que les matériaux se différencient essentiellement par une expulsion plus ou moins complète de l'air initialement emprisonné. Par ailleurs, nous avons constaté expérimentalement une liaison négative entre le degré de remplissage de la porosité ouverte et le rayon maximal des pores. Pour interpréter les constatations précédentes nous utiliserons des modèles.

Un modèle est un schéma de la réalité qui doit être à la fois suffisamment simple pour se prêter à l'étude (expérimentale ou mathématique) du phénomène et représentatif de la réalité, ou du moins d'un ou plusieurs de ses aspects. Ces modèles sont ici des schémas théoriques et des tubes en verre de forme particulière.

3. 21. *Schémas théoriques.*

Nous étudierons successivement la phase initiale d'emprisonnement d'air et la phase d'expulsion. Cette distinction, nette pour certains matériaux (les premières bulles d'air sortent de l'échantillon quelques secondes après immersion), est certaine-

ment beaucoup moins stricte pour d'autres pour lesquels les deux phases se recouvrent partiellement. Il n'en demeure pas moins que, même dans ce dernier cas, il est licite de continuer à distinguer en gros ces deux stades, au cours de l'humectation du matériau.

3. 211. *Phase d'emprisonnement d'air initiale.*

Au cours de cette phase, des bulles d'air apparaissent dans le milieu poreux en train de s'humecter.

Beaucoup de mécanismes d'occlusion d'air résultent de la manifestation d'effets capillaires dans des espaces lacunaires ayant une configuration particulière. Certains de ces mécanimes interviennent en dehors de toute submersion, lorsqu'on laisse l'échan-

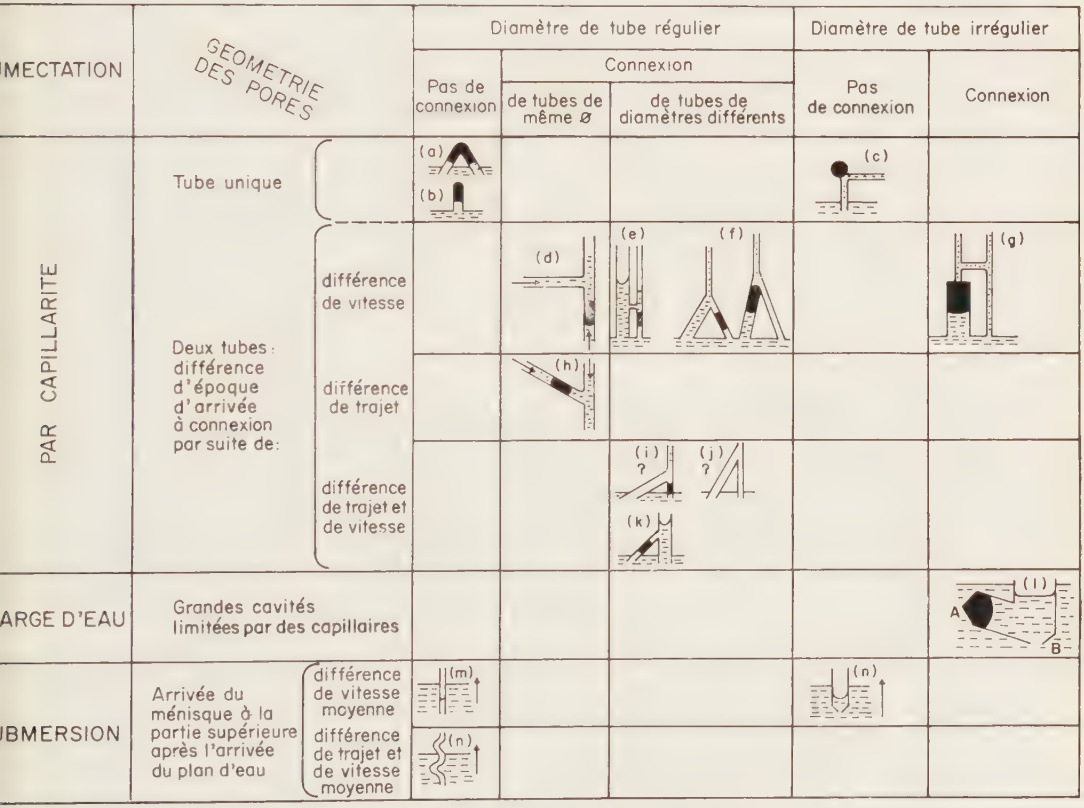


Fig. 15. — *Mécanismes d'emprisonnement initial d'air*

tillon s'humecter par une de ses faces. Nous donnons une énumération non limitative de ces processus expliqués sur la figure commentée (fig. 15) représentant des tubes de mouillabilité uniforme.

Rappelons d'abord quelques mécanismes existant dans les pores isolés de forme particulière :

— pénétration d'eau par les deux extrémités d'un canalicule aboutissant sur une même face du solide (fig. 15 *a*).

— arrêt de la pénétration de l'eau dans un cul-de-sac (fig. 15 *b*),
— emprisonnement d'air dans un tube de diamètre irrégulier de forme spéciale (fig. 15 *c*).

Comme le volume des pores précédents représente certainement une fraction assez faible de la porosité ouverte, l'existence de communications entre les pores est vraisemblablement une cause beaucoup plus fréquente d'emprisonnement d'air initial. Celui-ci provient du fait que les ménisques ne parviennent pas en même temps à la connexion entre les tubes. Les différences de

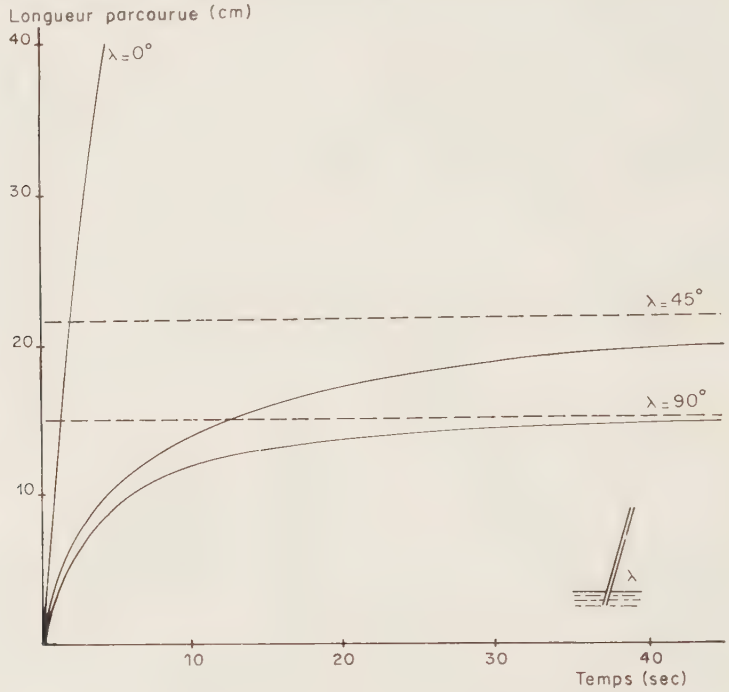


Fig 16. — *Trajet parcouru par le ménisque dans des capillaires de même diamètre inclinés sur l'horizontale*
Rayon des capillaires : 0,01 cm ; angle de raccordement eau-verre : nul
λ : angle entre le tube et l'horizontale

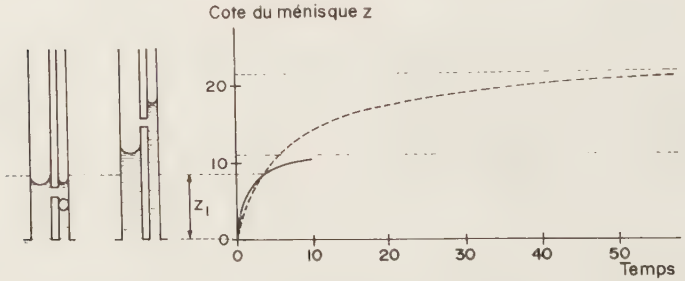


Fig. 17. — *Trajet parcouru par les ménisques dans des capillaires de diamètres différents*

trajet parcouru tiennent entre autres à des différences de vitesse provenant de l'inclinaison différente de tubes de même diamètre par rapport à l'horizontale ; la vitesse dans le tube le plus incliné est toujours supérieure à celle qui existe dans le tube le moins incliné (fig. 16) : mécanisme de la figure 15 *d* (Annexe 2).

La différence des rayons entre deux pores provoque des variations de vitesses compliquées par les différences d'ascension maximales (fig. 15 *e*, 17). Pour qu'il y ait emprisonnement d'air, la cote du

pore mettant en communication les deux tubes doit être inférieure à la cote z_1 commune aux deux ménisques. En effet, au-delà de cette cote, quoique le ménisque du pore étroit soit au-dessus de celui du pore large, l'eau ne peut se déverser par succion du pore étroit vers le pore large.

Il peut cependant se produire une bulle dans le tube le plus large (fig. 15 *f*), si le point de jonction entre capillaires est situé suffisamment haut et a une forme telle que le ménisque continue à avancer dans le tube étroit après être parvenu à y pénétrer. Des combinaisons entre les différences de diamètre des tubes et le rétrécissement d'un des tubes peuvent entraîner la formation d'une bulle (fig. 15 *g*).

Lorsque les tubes sont dans un plan horizontal, les ménisques n'arrivent pas ensemble au point de jonction des tubes parce que les distances parcourues pour y arriver ne sont pas les mêmes (fig. 15 *h*). On peut avoir enfin des combinaisons de différences de trajet et de vitesse (fig. 15 *j-k*).

Lorsque des cavités de grandes dimensions (où les actions capillaires sont nulles) sont limitées par des orifices de dimensions capillaires (fig. 15 *l*), l'humectation due à la capillarité est très faible, puisque la pression capillaire s'annule dès que le ménisque est parvenu dans la cavité. Le remplissage ne peut s'effectuer alors que sous l'action d'une charge d'eau. La force de freinage due à la viscosité étant importante au niveau des orifices étroits, le tube terminé par l'orifice le plus petit se comporte comme un pore en doigt de gant. Il y a en quelque sorte induction d'un pore en doigt de gant.

Une cause importante d'emprisonnement d'air est la submersion de l'échantillon, qui provoque la formation d'un autre ménisque à la partie supérieure de pores non encore remplis par le bas (fig. 15 *m, n, o*). La différence entre la vitesse d'élévation du plan d'eau autour de l'échantillon et la vitesse de déplacement des ménisques dans les pores (dérivée du quotient de la cote du ménisque par le temps) est déterminante : l'emprisonnement nul pour une différence de vitesse nulle croît avec la différence de vitesse et donc avec la rapidité de la submersion et la lenteur de progression verticale de l'eau dans les pores de l'échantillon (faible débit d'orifice aboutissant dans des cavités — effet de la tortuosité).

Les exemples précédents montrent l'importance de la configuration de l'espace poral sur l'occlusion de bulles d'air, qu'il s'agisse des connexions entre les pores ou de variations importantes de diamètre dans un même pore.

Lorsque la porosité est constituée de pores fins et relativement réguliers, l'ensemble de l'échantillon a tendance à s'humecter rapidement. Ceci réduit donc les risques d'emprisonnement par submersion (cf. fig. 15 *m, n, o*).

La non mouillabilité ($\pi/2 < \theta < \pi$) supprime tout remplissage par l'eau. Une diminution uniforme de la mouillabilité ($0 < \theta < \pi/2$) réduit la vitesse de pénétration de l'eau par le jeu de l'angle θ de raccordement. Ceci ne modifie pas les phénomènes d'emprisonnement d'air intervenant lorsque l'échantillon s'humecte par une face seulement, puisque les vitesses sont réduites partout de la même façon. Par contre, au moment de la submersion de l'échantillon, un volume plus faible des pores sera occupé par l'eau qui pénètre plus lentement ; on peut donc s'attendre dans ce cas à une augmentation de la quantité d'air occluse initialement.

De plus, des différences de mouillabilité d'un tube à l'autre provoquent des différences de vitesse des ménisques qui favorisent l'emprisonnement d'air.

On peut tenter d'évaluer la quantité d'air emprisonné dans la phase initiale. Pour cela, on étudie l'occlusion d'air dans un doublet de pores en considérant un cas particulier simple : doublet de pores horizontaux pour lesquels les effets de gravité sont nuls, la mouillabilité des parois étant uniforme.

Établissons d'abord l'*équation du déplacement du ménisque* à l'interface air eau. Selon BARRER (1958), la vitesse de déplacement de ce ménisque est donnée par l'équation traduisant l'équilibre entre les forces motrices (hydrostatiques et de tension superficielles) et les forces résistantes (viscosité), en négligeant les effets d'inertie (fig. 18). Force hydrostatique : $\pi r^2 \Delta p_h$ (Δp_h = différence de pression appliquée entre les deux extrémités du tube).

Force due à la tension superficielle $= 2 \pi r \, T_{EA} \cos \theta$. ($T_{EA}$ = tension interfaciale eau air, θ angle de raccordement).

Force due à la viscosité de l'eau n : $8\,\pi\,n \cdot x \cdot \frac{dx}{dt}$. On néglige les effets de viscosité de l'air.

L'équation s'écrit : $\pi r^2\,\Delta p_h + 2\pi r T_{EA} \cos\theta = 8\pi n \cdot x \cdot dx/dt$

Après intégration : $x^2 = \frac{1}{4n}\,(r^2\,\Delta p_h + 2\,r T_{EA} \cos\theta) \cdot t$

Considérons maintenant, avec Rose et Witherspoon (1956), un doublet de pores (fig. 19), c'est-à-dire 2 pores rectilignes cylindriques de même longueur l, mais de rayons différents r_1 et r_2 ($r_2 > r_1$).

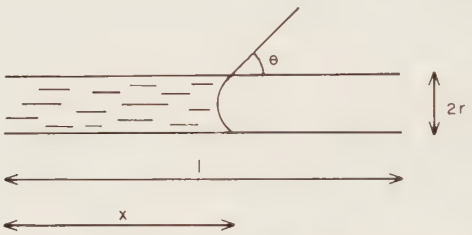


Fig. 18. — *Déplacement du ménisque dans un tube capillaire*

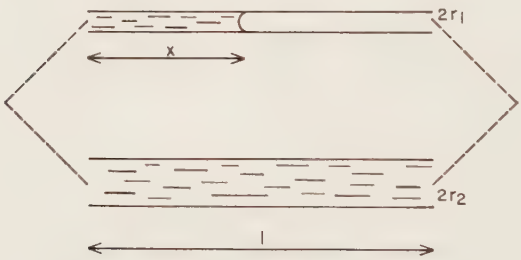


Fig. 19. — *Doublet de pores*

L'eau, qui pénètre dans les pores au même instant, avance plus vite dans le tube le plus large, comme l'indique l'équation précédente. Ce pore est rempli au bout du temps t, obtenu en remplaçant x par l dans l'équation déjà citée :

$$t = \frac{4\,nl^2}{r_2^2\,(\Delta p_h + 2\,T_{EA} \cos\theta/r_2)}$$

Au même temps t, le ménisque a parcouru la longueur x dans le petit tube :

$$t = \frac{4nx^2}{r_1^2\,(\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r_1)}$$

L'expression

$$t = \frac{4nx^2}{r_1^2\,(\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r_1)} = \frac{4nl^2}{r_2^2\,(\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r_2)}$$

donne : $x = l\,\frac{r_1}{r_2}\left(\frac{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r^1}{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos\theta/r^2}\right)^{\frac{1}{2}}$

Le volume d'air emprisonné à l'instant t est :

$$\pi r_1^2 (l - x) = \pi r_1^2 l \left[1 - \frac{r_1}{r_2} \left(\frac{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos \theta / r_1}{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos \theta / r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

En rapportant ce volume à celui du doublet, on obtient l'expression E :

$$E = \frac{\pi r_1^2 (l - x)}{\pi r_1^2 l + \pi r_2^2 l} = \frac{r_1^2 \left[1 - \frac{r_1}{r_2} \left(\frac{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos \theta / r_1}{\Delta p_h + 2T_{EA} \cos \theta / r_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{r_1^2 + r_2^2}$$

Cette expression se simplifie en posant :

$R = r_1 / r_2$, rapport du rayon du capillaire étroit à celui du capillaire large

$F = \Delta p_h / (2T_{EA} \cos \theta / r_1)$, rapport de la différence de pression appliquée à la pression capillaire dans le tube étroit.

$$E = \frac{R^2}{1 + R^2} \left[1 - R \left(\frac{1 + F}{F + R} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

L'expression E, nulle pour $R = 0$ ($r_1 = 0$, pas de doublet), passe par un maximum puis s'annule à nouveau pour $R = 1$ ($r_1 = r_2$, doublet de pores de même diamètre) (fig. 20). L'emprisonnement est ainsi maximum pour une certaine valeur du rapport

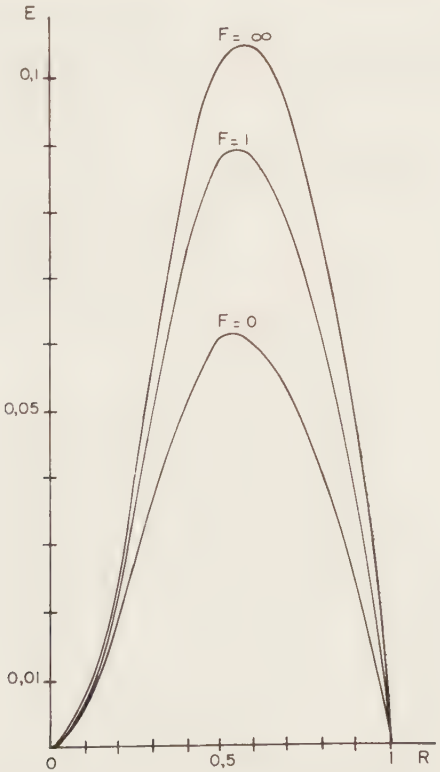


FIG. 20. — *Quantité d'air emprisonnée dans un doublet de pores en fonction du rapport des rayons R*

des deux rayons : en effet, la quantité d'air emprisonnée dans le pore le plus étroit tend à augmenter avec le rayon de ce pore, mais ce faisant, la vitesse du ménisque dans ce pore se rapproche de celle du pore large, ce qui diminue la quantité d'air emprisonnée ; on explique bien ainsi l'existence d'un optimum de R.

L'emprisonnement d'air croît avec F, comme le montre le signe de $dE/dF = -\frac{1}{2} \cdot \frac{R^3 (R-1)(1+F)^{-\frac{1}{2}}}{(1+R^2)(R+F)^{3/2}}$ qui est toujours positif, puisque $0 < R < 1$; E, qui prend la valeur $\frac{R^2}{1+R^2}(1-R)$ pour $F = 0$, tend vers l'asymptote $\frac{R^2}{1+R^2}(1-R)$ pour $F = +\infty$. La quantité d'air emprisonnée augmente donc avec le rapport de la différence de pression existant entre les deux extrémités du doublet à la pression capillaire dans le pore étroit. Sur la figure 20, on a représenté les relations $E = f(R)$ pour $F = 0$, $F = 1$ et $F = +\infty$.

Rappelons que la quantité d'air, emprisonnée lors de la phase initiale, constitue le maximum de la quantité emprisonnée définitivement, puisque l'expulsion peut intervenir par la suite.

3. 212. *Phase d'expulsion d'air.*

Examinons d'abord le devenir de l'air emprisonné dans le doublet. Pour cela comparons les pressions exercées aux deux extrémités de la bulle tout de suite après sa formation, c'est-à-dire après que le ménisque du tube large soit parvenu au point de jonction (fig. 21). Les pressions sont comptées par rapport à la pression atmosphérique.

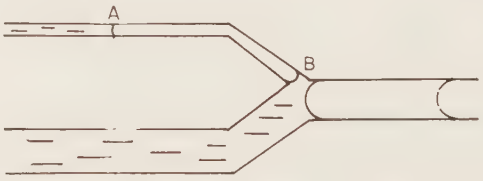


Fig. 21. — *Emprisonnement d'air dans un doublet de pores*

Lorsque l'imbibition se fait sous la seule action de la capillarité, la pression en A est $p_1 = 2T_{EA}\cos\theta/r_1$. En B s'exerce une pression de sens opposée p_1, diminuée de la pression $p_2 = 2T_{EA}\cos\theta/r_2$ qui existe en arrière du ménisque avançant dans le tube commun du doublet. Comme $p_1 > p_1 - p_2$ il n'y a pas équilibre et la bulle se déplace vers B où elle est progressivement entraînée par le courant d'eau. Le volume de la bulle diminuera tant qu'il y aura un ménisque dans le tube commun du doublet.

Si une différence de pression Δp_h est appliquée entre les deux extrémités du tube, les pressions sont en A : $\Delta p_h + p_1$ et en B : $p_1 - p_2$. Comme $\Delta p_h + p_1 > p_1 - p_2$, l'air sera encore expulsé en totalité. Il en sera de même lorsque il n'y a plus de ménisque dans le tube commun, les pressions en A et B étant respectivement $\Delta p_h + p_1$ et p_1.

Ainsi, pour un doublet de pores de mouillabilité uniforme, dans lequel aucun des tubes ne présente un rétrécissement, l'expulsion de l'air est complète, à moins que le mouvement de l'eau ne s'arrête. Cet arrêt peut être dû, dans le cas d'imbibition par

capillarité, au fait que les ménisques sont parvenus à l'extrémité du système poreux ; localement aussi, la circulation de l'eau peut être arrêtée dans un doublet parce qu'un emprisonnement d'air se produit en aval dans le gros pore. Lorsque la cause de la circulation est une différence de pression, sa disparition entraîne l'arrêt du mouvement de l'eau ; un certain degré de remplissage (cas d'échantillon immergé) a le même résultat.

Lorsque l'eau circule dans un corps poreux contenant des bulles d'air, il existe un autre mécanisme d'expulsion progressive de l'air. L'air sous pression dans la bulle d'air se solubilise partiellement dans l'eau ; cet air diffuse vers une région de l'espace poral où, à cause de la circulation de l'eau, qui déplace constamment l'équilibre, la teneur en air de l'eau est plus faible ; l'air dissous est alors entraîné avec l'eau. Ce mécanisme qui met en jeu successivement la diffusion sur une petite distance, puis le transfert de l'air dans l'eau en mouvement, permet d'évacuer des quantités d'air nettement supérieures à ce qu'on pourrait attendre de la seule diffusion de l'air de la bulle vers l'atmosphère dans l'eau immobile.

Même lorsque l'eau ne circule pas dans le corps poreux, les bulles d'air peuvent encore s'y déplacer. Le mouvement se fait de façon que l'énergie libre du système bulle eau devienne minimum : en effet, le déplacement de la bulle peut modifier les interfaces air eau, et air paroi, ce dernier changement ayant pour contrepartie un changement de l'interface paroi eau. Si l'analyse de ce déplacement est assez ardue, on peut, par contre, résoudre facilement le problème des conditions d'équilibre. Nous allons donc étudier la statique de la bulle d'air dans des tubes capillaires immergés dans l'eau.

Considérons d'abord un tube isodiamétrique cylindrique placé horizontalement. Il existe au niveau des ménisques limitant la bulle une pression qui est la somme de la pression capillaire et de la pression hydrostatique z, z étant la cote du tube par rapport au plan d'eau libre (fig. 22 *a*). Les pressions résultantes $p + z$ étant identiques à chaque extrémité de la bulle, celle-ci est en équilibre. Plaçons le tube verticalement (fig. 22 *b*). La pression en A est $z_A + p$ et en B $z_B + p$. Comme $z_B > z_A$, $z_B + p > z_A + p$. La bulle est poussée vers le haut jusqu'à expulsion complète. Donc, on ne peut avoir emprisonnement d'air à l'intérieur d'un capillaire isodiamétrique que dans le cas très particulier où ce capillaire est rigoureusement horizontal.

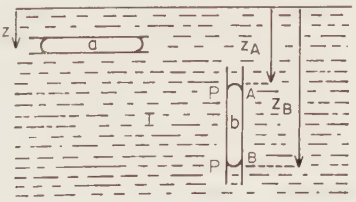


FIG. 22. — *Bulle d'air dans un capillaire isodiamétrique*

Ceci nous amène à considérer un capillaire cylindrique de rayon r, effilé à une extrémité de façon à avoir un orifice de rayon $r' < r$. D'après la loi de Laplace, les pressions capillaires aux extrémités seront respectivement p' et p telles que $p' > p$.

Plaçons ce tube horizontalement (fig. 23 *a*). Lorsque les ménisques ont la position de cette figure, la pression capillaire est plus forte en A qu'en B ; le ménisque A

va se déplacer vers B pour parvenir dans la section de rayon r ; les pressions capillaires sont alors égales en A et en B et l'équilibre est atteint.

Mettons le tube dans la position verticale, en distinguant deux cas suivant que l'extrémité la plus fine est en haut ou en bas.

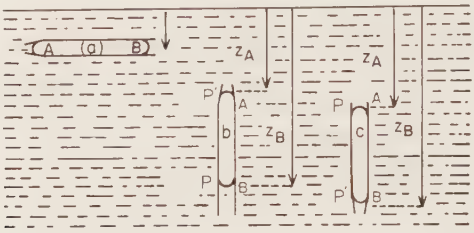


Fig. 23. — *Bulle d'air dans un capillaire ayant une de ses extrémités effilée*

a) L'extrémité la plus fine est en haut (fig. 23 *b*). Supposons la bulle dans la partie centrale de section uniforme. Les pressions capillaires étant identiques aux deux extrémités de la bulle, celle-ci se déplace vers le haut sous l'influence des différences de pression hydrostatique z_A et z_B. Lorsque l'extrémité A de la bulle parvient dans la partie effilée, on a :

$$\begin{array}{l} \text{en A} : z_A + p' \\ \text{en B} : z_B + p \end{array} \text{ avec } \begin{cases} p' < p \\ z_A < z_B \end{cases}$$

On aura équilibre si $z_A + p' = z_B + p$ ou $z_B - z_A = p' - p$.

Comme on peut toujours trouver une valeur de $z_B - z_A$ égale à $p' - p$, on parviendra à un équilibre, qui pourra être réalisé après expulsion d'une certaine quantité d'air. En aucun cas, il n'y aura expulsion totale de l'air.

b) L'extrémité la plus fine est en bas (fig. 23 *c*). Dans la position du schéma :

$$\begin{array}{l} \text{en A } z_A + p \\ \text{en B } z_B + p' \end{array} \qquad \text{avec } \begin{cases} z_B > z_A \\ p' > p \end{cases}$$

$z_B + p' > z_A + p$, la bulle se déplace vers le haut et la pression en B va devenir p. L'inégalité se réduit à $z_B > z_A$. La pression en B restant supérieure à la pression en A, la bulle se déplace vers le haut jusqu'à son expulsion complète du tube.

La discussion de l'équilibre peut se faire d'une façon plus synthétique en posant :

$p_{bas} - p_{haut} = \Delta p$, différence de pression capillaire entre le ménisque haut et le ménisque bas ;

$z_{bas} - z_{haut} = \Delta z$, différence de pression hydrostatique entre le bas et le haut de la bulle, et en examinant le signe de l'expression $\Delta z - \Delta p$. Par exemple dans le cas du tube qui a une extrémité effilée en haut, la condition d'équilibre $z_A + p' = z_B + p$ s'écrit avec la convention précédente $\Delta z - \Delta p = 0$. Les résultats sont rassemblés ci-dessous :

— tube isodiamétrique

horizontal *équilibre* $\Delta z - \Delta p = 0$
puisque $\Delta z = \Delta p = 0$

vertical expulsion $\Delta z - \Delta p > 0$
puisque $\Delta p = 0$ et Δz toujours > 0

— tube à extrémité effilée

horizontal *équilibre* $\Delta z - \Delta p = 0$
puisque $\Delta z = \Delta p = 0$

vertical ∅ pointe effilée en bas : expulsion $\Delta z - \Delta p > 0$
puisque $\Delta p < 0$ comme
p haut $- p$ bas < 0

∅ pointe effilée en haut : $\Delta p > 0$ puisque p haut $- p$ bas > 0
expulsion d'air par le haut tant que $| \Delta z | > | \Delta p$

Δp étant constant, on parvient à un *équilibre final* par diminution de Δz, lorsque $\Delta z - \Delta p = 0$.

Si on excepte le cas particulier des tubes horizontaux, on n'arrive à un équilibre de la bulle d'air et donc à un emprisonnement d'air que dans le cas d'un tube à extrémité effilée, si celle-ci est placée en position haute. L'irrégularité du diamètre des capillaires est donc une cause de diminution de l'expulsion de l'air, et favorise donc ainsi l'emprisonnement d'air définitif.

Examinons quelles peuvent être les conséquences d'une diminution uniforme de la mouillabilité sur la phase d'expulsion. Nous considérerons seulement le cas où il existe une certaine mouillabilité ($0 < \theta < \pi/2$), le remplissage étant évidemment théoriquement nul dans le cas de corps non mouillables ($\theta > \pi/2$). Dans le cas du tube vertical à extrémité effilée en haut, on a expulsion d'air par le haut jusqu'à ce que $\Delta z - \Delta p = 0$. La diminution de la mouillabilité se traduit par une modification de la formule d'équilibre qui s'écrit $\Delta z - \Delta p \cos \theta = 0$, en notant Δp la différence de pression capillaire qui existerait si la mouillabilité étant parfaite ; de plus ici $0 < \cos \theta < 1$. En diminuant le terme pression capillaire, on augmente la différence entre les termes pression hydrostatique et pression capillaire ; ce faisant, il faudra une plus grande diminution de Δz pour équilibrer $\Delta p \cos \theta$ que Δp, il y aura donc expulsion d'une plus grande quantité d'air avant que l'équilibre soit atteint. Une mauvaise mouillabilité provoquerait donc une expulsion d'air plus importante. Par contre, on peut penser que les variations de mouillabilité d'un point à un autre du capillaire augmentent la quantité d'air emprisonné.

L'étude de la statique de la bulle d'air a montré que l'expulsion n'est pas complète si une extrémité du tube est effilée. Ceci nous amène à compliquer le modèle du doublet de pores en introduisant un rétrécissement de rayon r_a à l'endroit où le petit tube rejoint le gros (fig. 24). Le volume d'air emprisonné dans la phase initiale n'est pas modifié par cette complication du modèle si le rétrécissement n'est pas suffisamment marqué pour empêcher le libre écoulement de l'air. D'après Morel-Seytoux (1959), on a équilibre si $p_1 = p_a - p_2$ (fig. 24 *a*) avec $p_a = \dfrac{2T_{EA} \cos \theta}{r_a}$

$$p_a = p_1 + p_2 \quad 1/r_a = 1/r_1 + 1/r_2$$

Avec une différence de pression imposée Δp_h (fig. 24 *b*) :

$$p_1 + \Delta p_h = p_a - p_2 \qquad p_a = p_1 + p_2 + \Delta p_h$$
$$1/r_a = 1/r_1 + 1/r_2 + \Delta p_h / 2T_{EA} \cos\theta$$

Dans le cas de la disparition du ménisque dans le gros tube ($p_2 = 0$), on a encore un équilibre possible (fig. 24 *c*), la valeur de p_a étant inférieure à celle de l'équilibre précédent, le rayon du rétrécissement doit être plus grand.

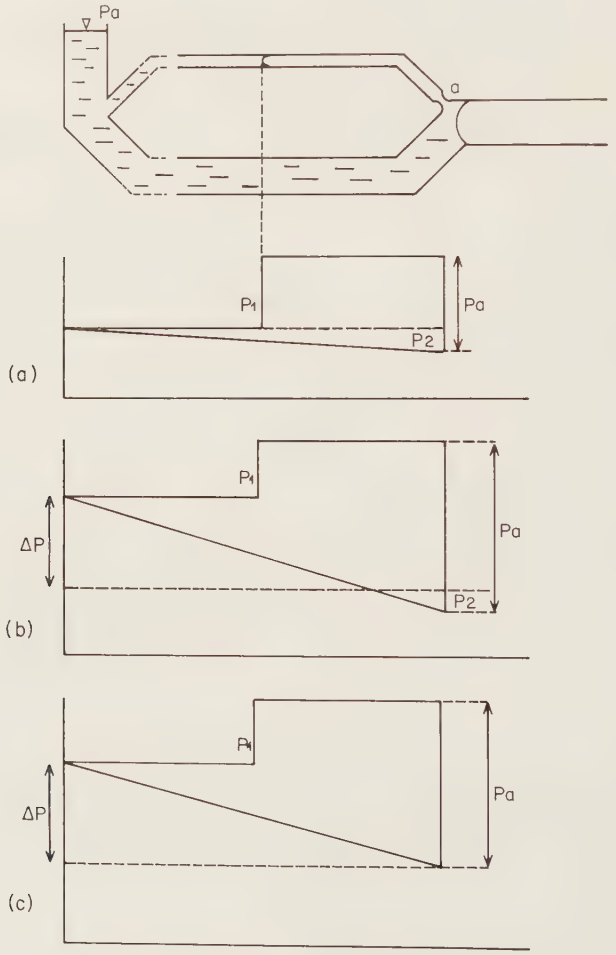


FIG. 24. — *Conditions d'expulsion de l'air dans un doublet de pores, l'un de ses pores présentant un rétrécissement*

a : inhibition sous l'effet de la capillarité
b : inhibition sous l'effet de la capillarité et d'une différence de pression
c : cas où le ménisque a disparu dans le tube large

On a d'autant moins de chances d'emprisonner définitivement de l'air que la différence de pression appliquée est plus grande. Rappelons qu'un gradient élevé favorise par contre l'emprisonnement initial d'air, ce qui montre bien la complexité du problème.

Il est important de noter que, dans le cas du doublet avec un rétrécissement, il y a un emprisonnement définitif d'air, ce qui n'était pas le cas lorsque les pores étaient réguliers, du moins si le mouvement de l'eau durait assez longtemps.

Il peut y avoir encore équilibre de la bulle d'air si le rétrécissement du capillaire est remplacé par une diminution locale de mouillabilité (θ devient θ' tel que $\theta' > \theta$) :

$$2T_{EA} \cos \theta'/r_1 = 2T_{EA} \cos \theta/r_1 + 2T_{EA} \cos \theta/r_2 + \Delta p_h.$$

Il en est de même si au même endroit le ménisque s'accroche à la paroi, ce qui entraîne une augmentation de courbure (Grémy et Pagès, 1966).

Une diminution uniforme de mouillabiité est sans influence sur l'emprisonnement d'air lorsque les effets capillaires interviennent seuls, puisque la relation entre r_a r_1 et r_2 est indépendante de cos θ. Par contre, avec un gradient de pression, r_a diminue en même temps que la mouillabilité. Le rétrécissement doit être d'autant plus marqué que la mouillabilité est plus faible.

3. 22. *Études sur modèles en verre.*

Nous avons vérifié sur des modèles en verre la réalité des mécanismes qui ont été imaginés précédemment.

Ces modèles sont destinés à schématiser les pores en communication et leurs irrégularités de diamètre (fig. 25). Comme il s'agit de suivre visuellement le remplissage du modèle, les diamètres des tubes capillaires sont assez grands. Par ailleurs, ces modèles qui ne permettent pas de calculer un coefficient permettant la transposition des résultats au milieu naturel, ont uniquement une valeur analogique.

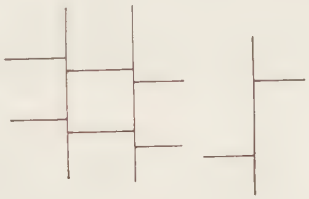


Fig. 25. — *Modèles en verre*

Nous avons d'abord vérifié, sur des tubes de verre de diamètre intérieur 100 et 500 μ immergés dans l'eau, la validité des considérations invoquées pour rendre compte de différences dans l'expulsion de l'air : l'emprisonnement d'air nécessite soit une humectation du tube dans la position horizontale, soit l'existence de différences de diamètre dans le tube capillaire placé verticalement avec le rétrécissement en haut.

Les modèles avec connexions ont été réalisés de façon à avoir, pour certains un diamètre uniforme des capillaires (sauf toutefois aux points de soudure), pour les autres des variations de diamètre.

— *Modèles à capillaires sensiblement isodiamétriques.*

L'immersion brutale des tubes de 1 mm provoque en général un faible emprisonnement d'air sous forme de bulles assez petites, souvent localisées au point de raccordement de 2 tubes, où, par construction, il y a une augmentation importante du diamètre intérieur. Une imbibition lente de type particulier (fig. 26) supprime le plus souvent cet emprisonnement d'air : on humecte les 2 tubes par capillarité, de

façon que les ménisques arrivent ensemble dans l'élargissement correspondant à la connexion des tubes, on élève ensuite le niveau de l'eau et le ménisque monte en chassant l'air au-dessus de lui. Au cours d'une imbibition sans précaution, au contraire, les ménisques n'arrivent pas simultanément au point de connexion, d'où emprisonnement d'air. Si on laisse pénétrer l'eau par un seul orifice, les tubes se remplis-

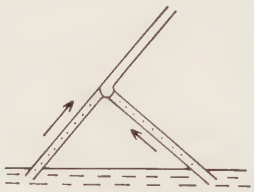


FIG. 26. — *Imbibition de type particulier*

sent de proche en proche sans qu'il y ait emprisonnement d'air, sauf toutefois aux endroits où, du fait de l'anastomose des tubes, un ménisque arrive par chacune des extrémités d'une section de tube.

— *Modèles à capillaires non isodiamétriques.*

Les tubes de 1 mm précédents ont été modifiés en effilant leurs extrémités sauf une. Lorsqu'on immerge le tube avec *l'extrémité non effilée en haut*, on a un emprisonnement d'air définitif beaucoup moins important que si on la place *en bas*. Dans le cas du tube le plus compliqué, les mêmes phénomènes se produisent et de plus l'emprisonnement d'air souvent localisé au voisinage des connexions est relativement beaucoup moindre dans les tubes adjacents au tube vertical non effilé en haut (fig. 27). Ces observations confirment que, dans un modèle constitué par un réseau

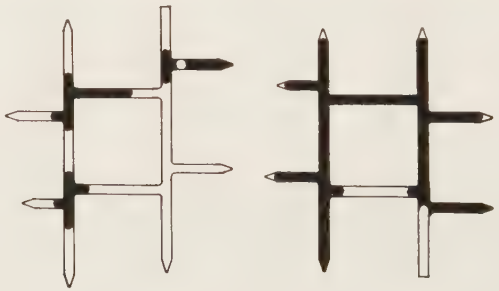


FIG. 27. — *Emprisonnement d'air dans un modèle en verre*
L'air est figuré en noir
à gauche : grand orifice en haut
à droite : grand orifice en bas

de tubes, les mêmes facteurs interviennent que dans les tubes simples, puisqu'un orifice relativement grand placé en position haute favorise toujours l'expulsion de l'air. La comparaison, dans le groupe des tubes interconnectés, de ceux à diamètre régulier et irrégulier, montre que l'occlusion d'air définitive est plus importante lorsqu'il y a irrégularité des diamètres.

On a utilisé aussi des tubes complexes de diamètre 3 mm qui ont eu leurs extré-

mités effilées, ce qui augmente les différences de diamètre des tubes. Si l'humectation est brutale, l'emprisonnement d'air est important et affecte environ la moitié du volume Selon la forme des tubes et leur disposition par rapport à l'horizontale, il peut y avoir expulsion d'une partie de l'air par les orifices supérieurs. Les mécanismes mis en jeu, tant pour l'occlusion initiale que pour l'expulsion partielle d'air, sont analogues à ceux signalés pour les tubes simples de diamètre irrégulier.

Une imbibition lente réduit considérablement l'emprisonnement d'air, en grande partie en permettant à l'air de s'échapper par les orifices supérieurs non encore submergés. Toutefois, même en procédant avec précaution, on ne parvient pas à remplir complètement les tubes. Il y a souvent des occlusions d'air dans les diverticules qui se comportent comme des pores en doigts de gant, du fait de la lenteur de pénétration de l'eau par une des extrémités (fig. 28). On réalise ainsi expérimentalement le « cul-de-sac induit » dont on avait évoqué la possibilité théorique.

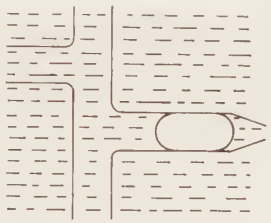


FIG. 28. — *Cul-de-sac induit dans un pore*

Les modèles constitués de tubes complexes ont confirmé la constatation déjà faite sur les tubes simples : rôle positif de l'irrégularité de la configuration des pores sur l'emprisonnement d'air. Ces modèles ont permis également de confirmer le rôle spécifique des connexions entre les pores sur l'emprisonnement d'air.

3. 23. *Conclusion sur l'emprisonnement d'air.*

Nous allons tenter une explication synthétique des différences de comportement des milieux poreux du point de vue de l'emprisonnement d'air, en nous appuyant sur les résultats des études de schémas théoriques et modèles.

L'emprisonnement d'air définitif résulte de la succession de deux processus, l'emprisonnement d'air initial et l'expulsion plus ou moins complète de l'air emprisonné au cours de la phase précédente.

L'emprisonnement initial d'air peut se produire, même lorsqu'on humecte un corps poreux avec précaution. Ceci implique l'existence de communications entre les pores, communications existant dans les milieux poreux naturels ; si les ménisques de deux capillaires n'arrivent pas ensemble à leur point de jonction, il y aura dans un des pores deux ménisques se déplaçant en sens inverse, isolant ainsi une bulle d'air. Cette différence d'arrivée des ménisques au point de jonction des tubes se produit dans des situations très variées : différence de rayon des pores, de tortuosité, de position par rapport à la verticale... L'irrégularité de la géométrie des pores et de leurs positions relatives joue un rôle essentiel.

Lorsqu'on applique une différence de pression hydrostatique entre les deux faces de l'élément poreux, il semble (d'après l'étude du doublet de pores) que la quantité initiale d'air emprisonné augmente avec cette différence de pression.

Au terme du processus que nous venons de décrire, il existe dans le corps poreux une certaine quantité d'air. Ensuite cette quantité d'air peut diminuer ; à partir de ce moment on entre dans la phase d'expulsion.

L'expulsion d'air peut se faire à la suite de la mise en jeu de plusieurs mécanismes.

Certains se produisent lorsqu'il y a circulation de l'eau dans le milieu poreux.

Le déplacement de l'eau crée une différence de pression entre les deux extrémités d'une bulle, qui se déplace ainsi, parvient dans un capillaire où l'eau circule et s'y divise en bulles plus petites qui sont entraînées par le courant. L'expulsion d'air est complète dans le cas idéal où les pores ont le même diamètre. Il n'en est plus de même si les pores présentent des rétrécissements : lorsque la bulle parvient à ce rétrécissement, la pression capillaire élevée peut équilibrer les autres pressions s'exerçant sur la bulle. Plus le gradient de pression appliqué entre les deux extrémités de l'échantillon est élevé, moins les conditions d'équilibre de la bulle ont de chances d'être satisfaites.

L'air occlus dans une bulle à l'équilibre peut sortir du corps poreux par diffusion sous forme dissoute dans l'eau. La circulation de l'eau favorise ce processus : la diffusion ne se fait plus jusqu'à l'extérieur, mais seulement jusqu'à un capillaire dans lequel l'eau en circulation entraîne l'air.

Après l'arrêt de la circulation de l'eau, la bulle peut encore se déplacer. Ceci nous amène aux facteurs de l'expulsion d'une bulle d'air. Pour un tube isolé, la condition d'expulsion s'écrit :

$$\Delta z - \Delta p > 0$$

Δz = différence de pression hydrostatique entre le bas et le haut du tube, expression constamment positive.

Δp = différence de pression capillaire entre le haut et le bas du tube.

Pour un réseau de tubes, il semble que les facteurs dont l'effet est traduit par la formule précédente interviennent de la même façon que pour un tube isolé. On peut donc essayer une transposition des résultats précédents aux milieux réels.

Si les rayons des pores sont à peu près réguliers, on a $\Delta p \neq 0$; l'inégalité $\Delta z - \Delta p > 0$ a beaucoup de chances d'être satisfaite pour presque tous les pores ; l'expulsion d'air est quasi totale. Lorsque les pores ont des diamètres variés, on peut admettre que statistiquement il y en a autant dont la plus grande section soit à la partie inférieure qu'à la partie supérieure. Dans la moitié des cas pour lesquels la section la plus large est en haut, on a avec nos conventions de signes $\Delta p < 0$, d'où $\Delta z - \Delta p > 0$: expulsion d'air. Lorsque la section étroite est en haut $\Delta p > 0$, la condition d'expulsion sera satisfaite si $\Delta z > \Delta p$. On a donc d'autant plus de chances d'avoir un emprisonnement d'air par défaut d'expulsion que Δp sera grand et donc que les différences entre les rayons seront plus grandes.

L'irrégularité de l'espace poral qui favorise l'emprisonnement d'air initial et contrarie l'expulsion de cet air augmente le volume d'air emprisonné de façon définitive. Cette irrégularité de l'espace poral se manifestant en particulier par les variations du diamètre des pores, on comprend le sens de la liaison hautement significative entre le volume d'air emprisonné et le rayon maximal des pores de chaque matériau. En effet, le rayon maximal constitue un indice de l'étendue de variation du rayon puisque les rayons les plus petits ont à peu près la même valeur pour tous les matériaux (cf. fig. 4). Le fait que les massifs de billes de verre se remplissent totalement et donc

d'une façon indépendante de leurs rayons renforce les conclusions précédentes, puisque comme on l'a déjà dit (section 3.14.) leur espace poral est assez régulier et relativement simple.

Le comportement d'un matériau vis-à-vis de l'eau dépend donc en grande partie de la configuration de son espace poral.

IV. — INFLUENCE DE LA DIMENSION DES ÉCHANTILLONS SUR LEUR REMPLISSAGE

L'influence de la dimension a été étudiée sur un nombre limité de matériaux : craie, brique, verre mousse, calcaire à milioles et andésite. Des éléments sensiblement cubiques de dimensions différentes ont été humectés à l'air avec précaution (élévation progressive du niveau de l'eau de façon à submerger l'élément en 6 heures, puis submersion pendant 40 jours). Quoique l'épaisseur de la lame d'eau au-dessus de la partie supérieure de l'échantillon soit sensiblement la même (1 cm), les conditions d'humectation diffèrent quelque peu avec la dimension des échantillons : notamment la pression hydrostatique est d'autant plus élevée, à la base de chaque élément qu'il a une hauteur plus grande.

4. 1. — *Résultats*

Les résultats portés sur un graphique humidité (p. 100 de poids sec) longueur de l'arête du cube (mm) (fig. 29), se traduisent par deux catégories de courbes :

— l'humidité sensiblement constante pour les faibles dimensions décroît ensuite rapidement ; c'est le cas de tous les éléments étudiés sauf la craie. Pour la brique, on ne peut se prononcer, puisque la dimension maximale est trop petite.

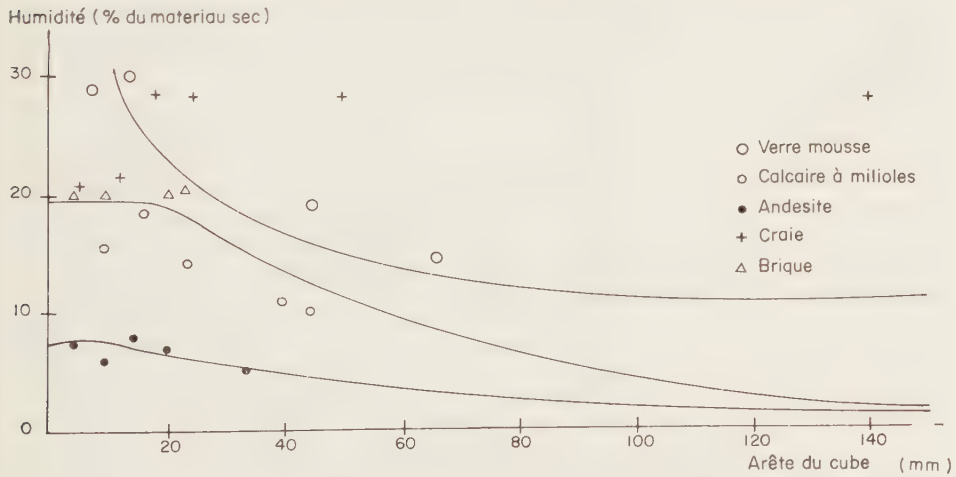


FIG. 29. — *Humectation et dimension des échantillons*

— l'humidité est indépendante de la dimension de l'échantillon pour la craie, dans la gamme des dimensions étudiées. Remarquons toutefois que, dans le cas de la craie, il y a, au voisinage de l'origine, une diminution d'humidité, qui reste inexpliquée.

4. 2. — *Interprétation*

Nous allons essayer de traduire ces deux catégories de courbes par une même relation entre l'humidité et la dimension des éléments. Si l'on considère, pour chaque matériau, l'abscisse du point à partir duquel l'humidité diminue lorsque la dimension croît, on constate qu'elle varie parallèlement à la hauteur d'ascension capillaire maxima (tabl. 5) pour le verre mousse, le calcaire à milioles et l'andésite. Pour la brique et la craie, qui ont des hauteurs d'ascension capillaire considérables, on s'est borné à constater que, pour des échantillons de dimensions inférieurs à la hauteur d'ascension capillaire, l'humidité était indépendante de la dimension. Cette observation n'est pas en contradiction avec ce qui a été constaté pour les trois éléments précédents et qu'on peut exprimer ainsi : *après immersion de longue durée, l'humidité d'un échantillon est indépendante de la dimension tant que celle-ci reste inférieure à une certaine valeur en liaison avec l'ascension capillaire maximale.*

TABLEAU 5

Hauteurs d'ascension capillaire maxima (mm)

Verre mousse	7,1
Andésite	16,5
Calcaire à milioles	18,7
Brique	supérieure à 170
Craie	supérieure à 370

Ceci nous a amené à faire l'hypothèse suivante : un élément plongé dans l'eau s'humecte sur une certaine épaisseur seulement, cette épaisseur dépendant de l'ascension capillaire maximale du matériau considéré (fig. 30).

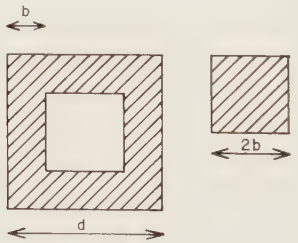


FIG. 30. — *Humectation par la périphérie des matériaux poreux*

La traduction mathématique de cette hypothèse va nous montrer qu'on retrouve ainsi la forme des courbes expérimentales. Considérons des éléments cubiques et posons :

H : humidité moyenne de l'élément (p. 100 du matériau sec)
d : arête du cube

b : épaisseur de matériau humectée
w : humidité de la zone humectée (p. 100 du matériau sec)
d_a : densité apparente du matériau.

Les fronts humides se rejoignent après avoir parcouru chacun la distance b (fig. 30).

L'humidité sera indépendante de la dimension et égale à w pour d inférieur ou égal à $2b$: ($0 \leqslant d \leqslant 2b$, $H = w$).

Pour $d > 2b$, nous allons calculer l'humidité H de l'élément qui est le rapport du poids d'eau au poids de l'élément.

Poids eau = humidité · poids du volume humecté

$$= \frac{w}{100} d_a [d^3 - (d - 2b)^3]$$

Poids de l'élément $= d_a \cdot d^3$

$$H = \frac{w d_a [d^3 - (d - 2b)^3]}{100 d_a d^3} = w \left[1 - \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^3\right],$$

expression constamment décroissante lorsque d croît.

Pour vérifier cette formule par voie statistique, nous allons la rendre linéaire, ce qui s'obtient ici par une transformation logarithmique.

$$H = w \left[1 - \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^3\right] \text{ peut s'écrire : } H = w - w \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^3$$

$$\frac{H - w}{w} = - \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^3$$

Posons $\frac{H - w}{w} = Y$ et $- \left(1 - \frac{2b}{d}\right) = X$; il vient $Y = X^3$.

Cette expression, dans laquelle ne figurent plus aucun des paramètres b et d, est valable pour un point expérimental quelconque, à condition qu'il se trouve sur une des courbes définies par l'équation générale et que $d > 2b$. La transformation revient donc, entre autres, à grouper en un ensemble unique les points expérimentaux appartenant aux divers matériaux.

La transformation logarithmique de $Y = X^3$ donne $\log Y = 3 \log X$, ou en posant $\log Y = Z$ et $\log X = T$, $Z = 3T$. La vérification statistique revient à montrer que, dans l'équation de régression,

$$Z = \alpha + \beta T$$
$$\alpha = 0 = \log 1 \quad \text{et} \quad \beta = 3$$
ou que, dans $Y = AX^\beta$, $A = 1$ et $\beta = 3$

Mais il reste à préciser la valeur des paramètres w et b permettant de calculer X et Y. L'humidité correspondant au palier initial horizontal est w : elle est déterminée par la valeur correspondant à la dimension la plus petite.

Le paramètre b est plus difficile à définir. Si nous avons de bonnes raisons de penser qu'il est en relation avec l'ascension capillaire maximale h de chaque matériau,

il n'est guère plausible qu'il lui soit égal : le matériau immergé s'humecte aussi sous l'action d'une charge d'eau et non sous la seule influence de la capillarité. Nous poserons $2b - ch$, c étant un paramètre à déterminer. Mais comme le calcul de la régression ne nous donne que α et β, nous chercherons par tâtonnement la valeur de c permettant d'obtenir approximativement $\beta = 3$. Pour $c = 0{,}53$, on obtient une régression significative au seuil 1 p. 100 expliquant 66 p. 100 de la variation de Z. $\alpha = 0{,}094$, ce qui donne log A = 1,916 et A = 0,82.

L'équation s'écrit alors : $Y = 0{,}82\ X^{3{,}01}$; elle est voisine de $Y = X^3$. Les figures 29 et 31 traduisent graphiquement les résultats de ces calculs.

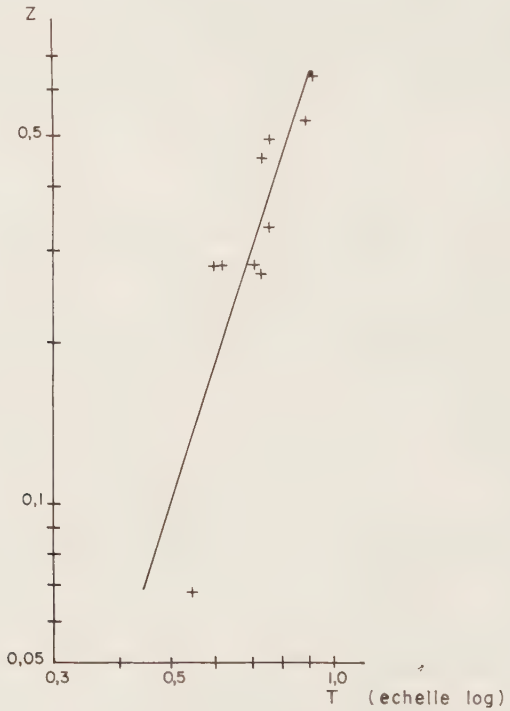


Fig. 31. — *Courbe* $Z = f(T)$

N. B. Les points sont les transformées de la courbe 29 qui satisfont à la condition $d > 2b$.

L'examen de la façon dont s'humectent le verre mousse et l'andésite, par fragmentation d'un échantillon préalablement immergé, montre que la pénétration de l'eau ne se fait pas sur une épaisseur d'humidité constante située à la périphérie de l'échantillon mais que l'humidité diminue de l'extérieur à l'intérieur : pour le verre mousse, les 2 à 3 mm extérieurs avaient une humidité de 71,9 p. 100, le centre ayant une humidité de 4,9 p. 100 seulement ; les 3 cm extérieurs de l'andésite ont une humidité de 4,7 p. 100, alors qu'au centre, elle est de 3,4 p. 100 ; on peut penser qu'avec des éléments de plus grandes dimensions, l'humidité est nulle au centre.

Le mécanisme de l'humectation est donc plus complexe que ne le suggère l'hypothèse à la base du calcul précédent. Ce dernier peut cependant être conservé si l'on admet que l'humidité au voisinage de la périphérie de l'élément est constante et égale

à « w » ; le paramètre « b » est une valeur fictive ainsi définie si H(y) est l'humidité pour l'abscisse y :

$$b \cdot w = \int_0^n H(y) \cdot dy,$$

n étant la valeur de y pour laquelle l'humidité du matériau est nulle.

Parce qu'il utilise un schéma simplifié de la réalité, le modèle mathématique proposé rend compte du comportement des matériaux en première approximation.

En conclusion :

— Au-delà d'une certaine dimension en liaison avec la hauteur d'ascension capillaire maximale, l'humidité moyenne d'un élément poreux immergé (exprimée en p. 100 du matériau sec) décroît lorsque la taille de l'élément considéré augmente.

– La variation de l'humidité H de l'échantillon peut s'exprimer en fonction de la longueur de l'arête et de deux paramètres : l'un b est proportionnel à la hauteur d'ascension capillaire maximale, l'autre w est l'humidité d'un élément cubique de 5 mm de côté. L'équation précédemment écrite relie ces diverses quantités et paraît valable en première approximation.

— Cette équation est en fait une formule semi-empirique indiquant *comment* varie l'humidité d'un matériau poreux quelconque en fonction de sa dimension, lorsqu'il est humecté dans des conditions définies. Nous n'avons pas proposé de justification théorique de l'intervention d'un paramètre proportionnel à la hauteur d'ascension capillaire maximale. Peut-être cette dernière n'intervient-elle que parce qu'elle est en corrélation avec la succion du matériau, qui joue un rôle sur l'emprisonnement d'air. Il faut en effet remarquer que, quoique l'humectation soit faite avec précaution, l'échantillon est submergé au bout de 6 heures et que des emprisonnements d'air sont possibles avant submersion du seul fait de l'intervention de la capillarité.

Malgré les réserves précédentes qui concernent seulement l'interprétation théorique, les éléments poreux rigides immergés s'humectent d'autant moins qu'ils sont plus grands, une fois dépassée une certaine dimension limite proportionnelle à l'ascension capillaire maximale.

Reçu pour publication en novembre 1971.

SUMMARY

EFFECTS OF THE COARSE CONSTITUENTS ON THE DYNAMICS OF WATER IN A SANDY SOIL

I. — BEHAVIOUR OF THE COARSE AND POROUS CONSTITUENTS WITH RESPECT TO WATER

Total porosity and the pore distribution feature both natural and synthetic porous materials.

The pore-water content is investigated under several conditions *i. e.*, careful but quick moistening at atmospheric pressure, and in vacuo.

Following moistening carried out promptly but carefully part of the voids remain air-filled the proportion of such voids featuring each material.

Theoretical and experimental investigations of the trapping of the air have shown that the more uneven is pore distribution the more substantial is such trapping.

Since the maximum pore radius is an indication of such uneveness, this explains the diminution between the maximal pore radius and the volume of trapped air expressed in per cent of the effective porosity.

ZUSAMMENFASSUNG

EINWIRKUNGEN DER GROBEN BESTANDTEILE AUF DIE DYNAMIK DES IN SANDIGEM BODEN ENTHALTENEN WASSERS

I. — VERHALTEN PORÖSER GROBER BESTANDTEILE GEGENÜBER DEM WASSER

Ein Kennzeichen der natürlichen und synthetischen porösen Substanzen besteht in ihrer vollständigen, offenen Porosität und der Formation ihres porösen Raums.

Der Grad der Füllung der offenen Poren mit Wasser wurde unter verschiedenen Bedingungen untersucht : Schnelle, vorsichtige Befeuchtung, unter Atmosphärendruck und im Vakuum.

Bei vorsichtiger Befeuchtung bleibt ein Teil der offenen Poren von Luft besetzt ; die Grösse des mit Luft gefüllten Anteils an offenen Poren bildet ein Kennzeichen jeder Art Material.

Die theoretische und experimentelle Untersuchung des Systems der Einschliessung der Luft ergibt, dass diese Einschliessung umso erheblicher ist, je unregelmässiger der Poröse Raum gestaltet ist.

Da der grösste Porenradius eine Anzeige dieser Unregelmässigkeit ist, ist der Grund für die parallel laufende Abnahme des grössten Porenradius und des (in Prozenten der offenen Porosität ausgedrückten) eingeschlossenen Luftvolumens verständlich.

РЕЗЮМЕ

Действие крупных элементов на динамику влаги в песчаной почве.

I. Поведение крупных элементов сопротивляющихся воде.

Р. ГРА.

Естественные и искуственные пористые материалы характеризуются их общей открытой порозностью и геометрией их порозного пространства. Степень заполнения открытой порозности влагой изучалась в различных условиях : быстрое увлажнение, осторожное увлажнение и увлажнение в вакууме.

После осторожного увлажнения часть открытой порозности остается занятой воздухом; размеры фракции открытой порозности заполненной воздухом характерны для каждого отдельного материала.

Теоритическое и экспериментальное изучение механизмов защемления воздуха показывает что оно тем более интенсивно, чем больше выражена нерегулярность порозного пространства.

Так-как максимальный радиус пор является признаком этой нерегулярности, можно легко понять причины регрессии существующей между максимальным радиусом пор и об'емом воздуха выраженным в процентах открытой порозности.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARRER R. M., 1948. Fluid flow in porous media. *Faraday Soc.*, discussion n° 3, p. 61.

CASSIE A. B., BAXTER S., 1944. Wettability of porous surface. *Trans. Faraday Soc.*, **40**, S 46.

FATT I., 1956. The network model of porous media. I. Capillary pressure characteristics. *Trans. Aime*, **207**, 144-159.

GRAS R., 1969. Considérations sur la porosité et l'étude des milieux poreux. *Sci. sol*, **2**, 79-89.

GRATON L. C., FRASER H. J., 1935. Systematic packing of spheres with particular relation to porosity and permeability. *Journ. of Geol.*, **43**, 785-909.

GREMY F., PAGÉS J.-C., 1966. *Éléments de biophysique.* Flammarion, 1 vol.

KEEN B. A., 1931. *Physical properties of the soil*, Longmans, 1 vol, 380 p.

MOREL-SEYTOUX, 1969. *Introduction to flow of immiscible liquids in porous media*, in J. M. de WIEST : *Flow through porous media.* Academic press, 1 vol.

ROSE W., WITHERSPOON P. A., 1956. Studies of waterflood performance. II. Trapping oil in pore doublet. *Illinois State geological survey*, Circular 224.

TURC L., Communication personnelle.

WENZEL R. N., 1936. *Industr.Engng. Chem.*, **28**, 988.

Ann. agron., 1972, **23** (3), 247-316.

EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX

II. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments grossiers. Variations positives d'humidité (1)

R. GRAS

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78 - Versailles

RÉSUMÉ

Un sol contenant des cailloux est un système hétérogène constitué de deux matériaux, la terre fine et les cailloux, désignés aussi sous le terme d'éléments grossiers.

La dynamique de l'eau dans un tel système a été étudiée expérimentalement en utilisant des tubes pleins d'un sol sableux renfermant des éléments grossiers de forme géométrique définie.

On a d'abord étudié leur influence sur la cinétique du front humide avançant dans un sol sableux initialement sec, dans diverses conditions d'alimentation en eau : infiltration avec plan d'eau, humectation verticale et horizontale. Les résultats expérimentaux ont été interprétés dans les cas simples à l'aide des lois de l'hydrodynamique.

Une fois le système humecté, on examine l'effet des éléments grossiers sur la transmission de l'eau par le système. Tous les éléments diminuent la perméabilité globale du système.

Au cours des expériences précédentes, les éléments grossiers poreux peuvent s'humecter à partir du sable. Les variations d'humidité enregistrées tiennent à la nature des matériaux grossiers et aux succions exercées par le sol sableux et les éléments grossiers sur l'eau.

INTRODUCTION

Nous étudions la dynamique de l'eau dans le système hétérogène terre fine éléments grossiers, en nous limitant aux phénomènes provoquant une variation positive d'humidité et à la transmission de l'eau saturante par le système.

Une attention particulière est attachée aux conséquences de la dynamique de l'eau dans la terre fine sur le remplissage des éléments grossiers poreux, puisque la quantité d'eau absorbée par ces éléments va déterminer leur contribution éventuelle à l'alimentation en eau de la végétation.

(1) Deuxième partie d'une thèse de Doctorat d'État soutenue le 21 septembre 1971 à l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg.

Les modalités de la circulation de l'eau dans la terre sont très variées et on peut classer l'ensemble des cas suivant plusieurs critères.

Un de ceux-ci considère le degré de remplissage de la porosité ouverte. Lorsque cette porosité est entièrement occupée par l'eau, celle-ci est dite *saturante* ; elle n'est soumise à aucune tension d'origine capillaire et la pression hydrostatique s'y transmet intégralement. L'eau est dite *non saturante*, lorsqu'une phase gazeuse subsiste à côté de la phase liquide. Si cette phase gazeuse est isolée de l'atmosphère extérieure (air emprisonné), les propriétés de l'eau saturante, et notamment, la transmission des pressions hydrostatiques, sont conservées, du moins avec une approximation convenable. Par contre, lorsque la phase gazeuse communique avec l'atmosphère extérieure, l'eau est soumise à des actions capillaires et la transmission des pressions est considérablement perturbée.

D'un autre point de vue, on peut considérer la variation dans le temps de la teneur en eau du sol. La *filtration* est la transmission de l'eau d'une extrémité à l'autre de l'échantillon considéré comme saturé, son humidité est alors constante. Lorsque l'eau pénètre dans un sol sec, l'humidité en arrière du front humide étant voisine de la saturation et relativement constante, on parle d'*infiltration*. Le terme *humectation* désigne l'augmentation de la teneur en eau non saturante et le terme *dessiccation* le phénomène inverse.

Les cas réels n'appartiennent pas toujours à une catégorie bien définie. Par exemple, lorsque l'eau s'infiltre *per descensum* dans un sol sec, on n'est pas assuré que l'eau soit saturante dans toute l'épaisseur de sol humecté ; mais surtout des actions capillaires importantes se produisent à la limite terre humide-terre sèche.

Aussi, nous n'étudierons pas l'action des éléments rigides dans l'ensemble du domaine de la circulation de l'eau, mais nous considérerons seulement quelques situations particulièrement importantes dans le milieu naturel :

— circulation *per descensum* à la suite de l'*existence d'un plan d'eau* d'épaisseur constante à la surface du sol. Cette situation se produit dans le milieu naturel lorsqu'une lame d'eau s'établit à la surface du sol. On considérera deux phases successives : la pénétration de l'eau dans un sol sec que nous désignerons par infiltration, même si la saturation n'est pas totale et la transmission de l'eau par le sol en principe saturé, la filtration ;

— circulation *per descensum* par apport d'eau à débit constant, sans établissement d'une lame de liquide à la surface du sol. Ce cas, fréquent dans le milieu naturel, sera désigné par humectation verticale ;

— circulation horizontale de l'eau dans un sol sec sous l'influence de la succion du sol : humectation horizontale ;

— dessèchement du sol sous l'influence d'une succion. C'est un processus de dessèchement se produisant dans le sol au voisinage des racines, ou d'une surface évaporante.

Pour déceler les modifications apportées à l'écoulement de l'eau dans un milieu meuble par la présence de matériaux grossiers, il importe d'abord de connaître l'écoulement de l'eau dans le milieu meuble seul pour les différents cas envisagés précédemment. C'est pourquoi nous étudierons d'abord la dynamique de l'eau dans le sable.

I. — DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LE SABLE

Après une brève description du dispositif expérimental utilisé et un rappel des lois de la circulation de l'eau dans les milieux poreux, nous examinerons comment ces lois s'appliquent au matériau meuble choisi.

1. 1. — *Dispositif expérimental*

L'étude a été réalisée en utilisant des tubes cylindriques transparents de diamètre intérieur 5 cm environ, remplis de sable fin dit de Fontenay, décrit ultérieurement (en 5. 11) ; en effet la finesse de certaines de ses particules assure un bon contact avec le matériau rigide, et l'état de ce contact est indépendant de l'humidité, puisque ce sable ne gonfle pratiquement pas. Le sable a été introduit par fraction de 50 g et tassé au maximum avec un piston constitué d'un bouchon de caoutchouc placé au bout d'une tige. Il a fallu prévoir, à la base du tube, un dispositif retenant le sable fin, tout en modifiant le moins possible l'écoulement de l'eau. Nous avons choisi de fermer le tube à sa base par un grillage supportant une couche de quelques centimètres de sable grossier (diamètre des grains 2 mm), surmontée d'un grillage de maille 0,4 mm. Le sable fin pénètre un peu dans la couche de sable grossier, mais est vite arrêté, ce qui permet de réaliser un tassement homogène du sable fin au-dessus. Nous avons préféré utiliser ce dispositif plutôt qu'un papier-filtre ; en effet, on n'était pas assuré que ce dernier ne se colmaterait pas partiellement par les quelques éléments fins entraînés lors de la percolation, ou ne modifierait pas l'écoulement par sa seule présence.

Selon le type d'écoulement étudié, des modifications de détail ont été apportées au montage des tubes et nous les signalerons ultérieurement.

Les caractéristiques du sable tassé dans le tube sont :

— densité apparente = 1,47
— densité réelle = 2,65
— porosité calculée à partir des paramètres précédents : 44 p. 100
— ascension capillaire maxima = 70 cm (mesurés au bout de 500 heures).

1. 2. — *Généralités sur la circulation de l'eau dans un milieu poreux*

1. 21. *Eau saturante. Loi de Darcy.*

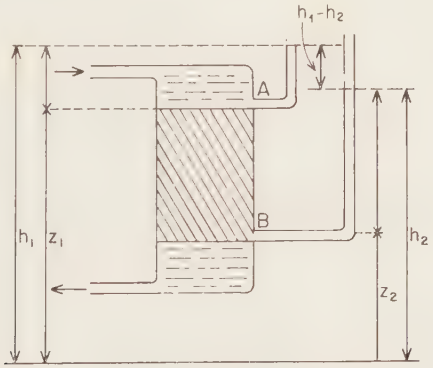


FIG. 1. — *Loi de Darcy*

On fait circuler de l'eau dans un système (fig. 1) constitué par un matériau poreux de section constante S et de longueur l que nous appellerons *filtre* ; les indications des piézomètres placés en A et B aux extrémités du filtre étant h_2 et h_1, le débit D est donné par la formule :

$$D = - KS \frac{h_2 - h_1}{l}$$

c'est la loi de Darcy. En posant

$h = h_2 - h_1$, différence des charges hydrauliques, on a : $D = - KS\, h/l$.

La vitesse brute fictive est $V = D/S$:

$$V = - K \frac{h}{l}$$

Calculons en hauteur d'eau les pressions p mesurées par les piézomètres, ρ étant le poids spécifique de l'eau.

En A : $p_1 = \rho\,(h_1 - z_1)$ ce qui donne $h_1 = z_1 + p_1/\rho$

B : $p_2 = \rho\,(h_2 - z_2)$ $\qquad h_2 = z_2 + p_2/\rho$

Les expressions telles que h_2 et h_1 appelées *charges* hydrauliques sont la somme de deux termes : l'un z est la charge due à la gravité (mesurée par la cote) et l'autre p/ρ est la charge due à la pression.

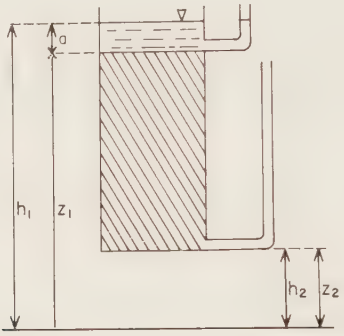


FIG. 2. — *Loi de Darcy, dans le cas de l'existence d'un plan d'eau en surface*

Lorsqu'on maintient une lame d'eau d'épaisseur constante « a » au-dessus du filtre et que l'eau s'écoule librement à la base (fig. 2),

on a : $h_1 = z_1 + a$

$h_2 = z_2$

et la loi de Darcy s'écrit :

$$D = -KS\,\frac{(z_1 + a) - z_2}{l}$$

$$= -KS\,\frac{(a + z_1 - z_2)}{l}$$

comme $z_1 - z_2 = l$

$$D = -KS\,\frac{(a + l)}{l}$$

La quantité $(h_2 - h_1)/l$, quotient d'une différence de charge par une différence de longueur, s'appelle le gradient hydraulique ; la loi de Darcy peut donc encore s'écrire ainsi :

$$D = -KS\,\frac{dh}{dl} \quad , \; h \text{ étant un potentiel.}$$

On peut alors exprimer cette loi sous forme vectorielle

$\vec{D} = -K\,\overrightarrow{\text{grad}\,h}$ ou $\vec{D} = -K \cdot \nabla h$, $\qquad \nabla$ étant l'opérateur $\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$

$\vec{D}$ est la densité de flux d'eau, quantité d'eau transmise par unité de temps et par unité d'aire d'une surface normale à la direction de l'écoulement. On retrouve la formulation de lois phénoménologiques, comme celle d'Ohm pour l'électricité. Nous utiliserons ultérieurement l'analogie de la loi de Darcy avec cette dernière loi.

I. 22. *Eau non saturante* (GARDNER, 1958 ; SWARTENDZRUBER, 1969).

Lorsque le milieu n'est plus saturé et que la phase gazeuse communique avec l'extérieur, l'eau se déplace encore sous l'influence d'une différence de potentiel h, ce qui donne une expression analogue à la loi de Darcy : $D = -K\,\text{grad}\,h$. L'existence de la phase gazeuse a deux conséquences

sur les termes de cette équation. D'une part, la perméabilité K est plus faible qu'en milieu saturé, puisque la section utile pour la circulation du liquide est plus petite et cette perméabilité K dépend de l'humidité H : $K = K(H)$. La présence dans certains pores d'une interface air-eau entraîne une modification de la fonction potentiel h, la composante de pression devenant une succion ψ et la composante z due à la gravité restant inchangée ; cette succion est, elle aussi, fonction de l'humidité H : $\psi = \psi(H)$. Le potentiel s'écrit donc : $h = z - \psi(H)$ et on obtient :

$$D = K(H) \cdot [\nabla z - \nabla \psi(H)]$$

pour la circulation verticale *per descensum*.

A la différence de ce qui se passe lorsque la loi de Darcy est applicable, l'humidité H est une fonction des coordonnées x, y, z du point considéré dans le milieu poreux et du temps t : $H(x, y, z, t)$.

Cette humidité peut être théoriquement obtenue à partir d'une équation aux dérivées partielles qu'on établit à partir de l'équation précédente et du principe de la conservation de la masse.

$$\frac{\partial}{\partial x}\frac{(M\,\partial H)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\frac{(M\,\partial H)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\frac{(M\,\partial H)}{\partial z} + \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial H}{\partial t},$$

M étant l'expression $K(H) \cdot (\partial\psi/\partial H)$.

Cette équation aux dérivées partielles décrit, suivant les conditions initiales et les conditions aux limites imposées, l'humectation du sol, son dessèchement, etc.

1. 3. — *Filtration en tube vertical avec plan d'eau*

La loi de Darcy s'appliquant aux matériaux meubles homogènes, nous nous sommes limité à l'étude de quelques points précis :

— incidence d'une humectation brutale ou ménagée sur la perméabilité ;

— stabilité des débits dans le temps.

1. 31. *Méthode d'étude.*

Deux catégories de tubes ont été utilisées avec des modes d'humectation différents.

Les tubes courts, comprenant une épaisseur de 20 cm de sable sur une couche de 3 cm de sable grossier ont été humectés de deux façons :

— humectation progressive, par capillarité : La partie inférieure du tube est plongée dans l'eau, dont on élève progressivement le niveau, de façon qu'il reste au-dessous du niveau du front humide dans le sable ; la colonne de terre est humectée en 30 minutes. Ensuite, on amène le niveau de l'eau au niveau supérieur du sable et on laisse les choses en l'état pendant 17 heures avant de réaliser la filtration ;

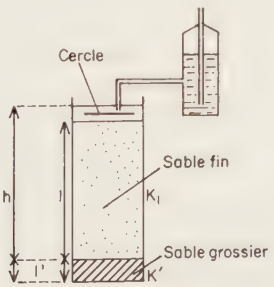


FIG. 3. — *Dispositif expérimental utilisé pour les infiltrations et filtrations*

— humectation rapide obtenue en établissant brutalement une lame d'eau de 1 cm à la surface du sable ; les débits transmis sont mesurés une fois que le front humide est parvenu à la base du tube.

Pour des raisons qui seront données plus tard, on a utilisé aussi des tubes longs avec une

épaisseur de 48 cm de sable de Fontenay sur 2 cm de sable grossier. Tous ces tubes ont été humectés rapidement, comme cela est décrit dans le paragraphe précédent ; les débits transmis ont été mesurés de la même façon.

On a établi une lame d'eau de 1 cm d'épaisseur à la surface du sable au moyen d'un vase de Mariotte gradué utilisable comme débitmètre (fig. 3). Pour éviter l'érosion de la surface par cette arrivée d'eau, on a placé à 5 mm au-dessus du niveau du sol un cercle métallique de diamètre inférieur à celui du tube.

Les débits en filtration étaient mesurés en pesant l'eau recueillie à la base du tube, le temps zéro correspondant à la chute de la première goutte de la base du tube.

I. 32. *Résultats.*

Dans tous les cas, la quantité d'eau recueillie à la base du tube est proportionnelle au temps (fig. 4). L'instabilité structurale, le gonflement et la dispersion de colloïdes par l'eau interviennent de façon négligeable.

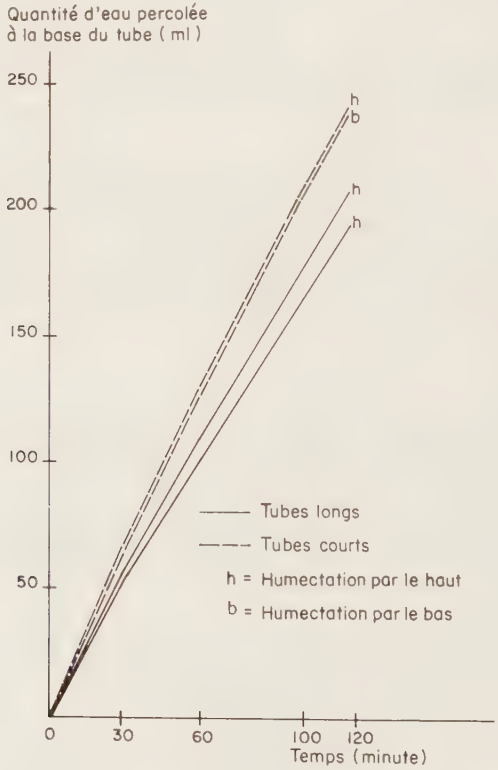


FIG. 4. — *Quantité d'eau recueillie à la base des tubes témoins*

Les modes d'humectations, dont l'influence a été étudiée seulement pour les tubes courts, n'interviennent pas de façon sensible sur les débits : en une heure, 152 ml avec humectation progressive et 148 ml avec humectation brutale.

Les différences entre les quantités d'eau transmises par les tubes longs, tous humectés rapidement, étaient faibles : 5,7 p. 100 de la moyenne au bout d'une heure, 6,5 p. 100 au bout de 2 heures. De telles différences tiennent au fait qu'il n'est pas possible de remplir les tubes de sable de façon identique ; la reproductibilité est cependant convenable.

Ces manipulations ayant aussi pour but de déterminer le coefficient de perméabilité du sable de Fontenay, on a comparé les valeurs fournies par les tubes longs et les tubes courts. Les dispositifs utilisés sont des filtres complexes, puisqu'ils comprennent une couche de sable fin d'épais-

seur l et de perméabilité K_1 à déterminer, surmontant une couche de sable grossier de longueur l' et de perméabilité K'. Le débit du filtre complexe est, d'après Schneebeli (1966) :

$$D = \frac{S\,(h + l')}{l/K_1 + l'/K'} \qquad \text{(fig. 3)}$$

Nous avons utilisé cette formule pour calculer K_1 ; en effet, la formule simplifiée négligeant le fait que le filtre est complexe et prenant comme charge « h » et comme longueur du filtre « l » introduit une erreur appréciable, du moins pour les tubes courts (Annexe 3). Comme un peu de sable fin a pénétré dans le sable grossier occupant 12 p. 100 de sa porosité, la valeur de la perméabilité du sable grossier, 15,5 cm/mn, a été arrondie à 15.

Les résultats sont exprimés en cm/mn :

Tubes courts, humectation par le bas = 0,072 9
humectation par le haut = 0,076 8
Tubes longs humectés par le haut = 0,071 4

Il n'y a pas d'influence sensible du mode d'humectation et de la longueur des tubes.

Pour des tubes courts, l'erreur est de 5,2 p. 100 et pour les tubes longs de 4,8 p. 100 ; ces erreurs sont supérieures à celles données par le calcul d'erreur (Annexe 4), certainement parce que ce dernier ne prend pas en compte les différences de tassement du sable d'un tube à l'autre.

Nous prendrons en définitive comme valeur de la perméabilité du sable de Fontenay $K_1 = 0{,}07$ cm/mn.

1. 4. — *Infiltration dans un tube vertical avec plan d'eau en surface*

Comme le sable est initialement sec, l'humectation peut être suivie par le déplacement du front humide. La variation de la cote du front humide z en fonction du temps t est une courbe.

Pour mettre en évidence l'influence d'un élément grossier, on pourrait comparer un tube témoin sans élément à un tube avec élément. Mais les conditions expérimentales (tassement du sable, établissement du plan d'eau à l'instant initial) pouvant être différentes entre les deux tubes, il serait préférable d'utiliser un seul tube. C'est ce que nous avons fait, en remarquant ceci :

Lorsqu'on humecte un tube vertical de sol sec renfermant un élément grossier dont la partie supérieure est à la cote z_1 (les cotes sont comptées positivement vers le bas à partir de l'extrémité haute du filtre), la circulation de l'eau n'est pas modifiée par l'élément grossier dans l'intervalle $0 - z_1$. Supposons qu'on puisse déterminer la courbe $z = f(t)$ de la cote z du front humide en fonction du temps t, à l'aide des seules observations de l'intervalle $0 - z_1$; on pourra alors par extrapolation décrire le déplacement du front humide qui se serait produit s'il n'y avait pas eu d'élément grossier et ainsi mettre en évidence l'effet de ce dernier. En outre, la connaissance de l'équation $z = f(t)$ pourra être utile pour l'interprétation des résultats expérimentaux. Pour établir cette équation, on utilisera l'homologie entre la circulation de l'eau dans un tube capillaire et dans un filtre.

1. 41. *Homologie entre la circulation de l'eau dans un tube capillaire et dans un filtre.*

De Wiest (1969) signale l'homologie précédente pour la loi de Poiseuille et la loi de Darcy. A la vitesse réelle du fluide dans un capillaire, correspond une valeur hydraulique moyenne, la vitesse brute fictive, quotient de la quantité d'eau percolée par la section du filtre.

Loi de Poiseuille	*Loi de Darcy*
Capillaire de section πr^2 n = viscosité de l'eau Vitesse réelle : v	Filtre de section S Vitesse brute fictive : V
$v = \frac{r^2}{8n}\frac{dh}{dl}$	$V = K\frac{dh}{dl}$
$D = \pi r^2 \cdot \frac{r^2}{8n} \cdot \frac{dh}{dl}$	$D = KS\frac{dh}{dl}$

On a les correspondances suivantes :

$r^2/8n$	K
πr^2	S

On peut donc espérer transposer à un milieu poreux les équations écrites pour les tubes capillaires.

1. 42. *Calcul de l'équation de la cinétique du front humide.*

Dans un tube capillaire de rayon r, l'eau se déplace sous l'influence de son poids et de la pression capillaire.

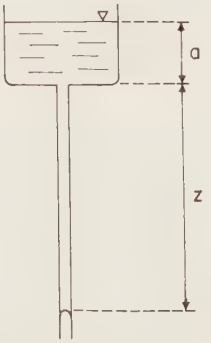


Fig. 5. — *Déplacement de l'eau dans un tube capillaire vertical*

Le débit $D = dq/dt$ s'écrit avec les notations de la figure 5, q étant la quantité d'eau :

$$D = \frac{dq}{dt} = \frac{\pi r^4}{8n}\left(\frac{z + a + \psi}{z}\right) = \pi r^2 \cdot (r^2/8n)\left(1 + \frac{a + \psi}{z}\right).$$

On a entre capillaire et filtre les correspondances suivantes :

Capillaire	Filtre
z = cote du ménisque	z = cote du front humide
πr^2	S
$r^2/8n$	K
q = quantité d'eau contenue dans la hauteur z de capillaire	Q = quantité d'eau saturant sur l'épaisseur z un filtre de porosité P.

La transposition permet d'écrire pour le filtre : $D = KS(z + a + \psi)/z$.

Courau (1967) a vérifié la validité de cette loi sur un milieu poreux artificiel, ce qui justifie *a posteriori* cette démarche de transposition.

Il faut maintenant relier le débit D du filtre à la cote z du front humide. P étant la porosité : $Q = (P/100)\, Sz$, d'où $D = dQ/dt = (PS/100)\, dz/dt$. En portant D dans l'équation précédente :

$$D = (PS/100)\,(dz/dt) = KS\,(z + a + \psi)/z$$

$$dz/dt = (100K/P)\,(z + a + \psi)/z$$

$$\frac{z\cdot dz}{z + a + \psi} = (100\,K/P)dt$$

En remarquant que :

$$\frac{z}{z + a + \psi} = \frac{z + a + \psi - (a + \psi)}{z + a + \psi} = 1 - \frac{a + \psi}{z + a + \psi},$$

on intègre l'équation précédente. Pour calculer la constante d'intégration, on écrit que pour $t = 0$, $z = 0$. En définitive :

$$z + (\psi + a)\ \mathrm{Log}\left(\frac{\psi + a}{z - \psi + a}\right) = (100\ K/P)\ t$$

Le calcul de la quantité d'eau consommée cumulée au temps t s'effectuerait à partir de l'équation du débit où l'on remplacerait z par sa valeur en fonction de t ; cela n'est pas possible, parce que l'équation reliant z à t est implicite.

I. 43. *Examen de la validité de l'équation pour rendre compte de la cinétique du front humide dans le sable.*

Pour écrire l'équation dans le cas du tube plein de sable, il faut disposer des valeurs numériques de ψ, K et P pour le sable dans les conditions d'infiltration.

On peut tourner la difficulté pour K et P, en posant $A = 100\ K/P$, ce qui donne

$$z + (\psi + a)\ \mathrm{Log}\left(\frac{\psi + a}{z + \psi + a}\right) = At$$

Si A est sensiblement constant au cours d'une expérience, la formule sera valable.

Pour ψ, on sait que l'ascension capillaire dans le sable se poursuit encore au bout de 500 heures, ce qui est normal puisque ce matériau peut être assimilé à un faisceau de capillaires de diamètres différents. En effet, les ménisques dans les gros capillaires atteignent rapidement la hauteur maxima, tandis que les ménisques des capillaires étroits s'élèvent plus haut mais plus lentement.

Une tentative de calcul faite en utilisant pour ψ, 70 cm (hauteur de l'ascension au bout de 500 heures) donne une valeur de A sensiblement constante (de 0,17 au début de l'expérience à 0,14 à la fin — valeur moyenne 0,15).

En fait, cette constatation ne saurait constituer une vérification de l'exactitude de la valeur de ψ, puisqu'il existe un ensemble de valeurs du couple ψ, A qui satisfont à un bon ajustement, comme on l'a vérifié.

De plus, la valeur de A n'est guère compatible avec le fait que le sable n'est pas saturé. Le rapport z/Q, de la cote du front humide à la quantité d'eau entrée dans le filtre, est sensiblement constant au cours d'une expérience (0,133 au début — 0,129 à la fin — moyenne = 0,131).

Ceci entraîne que le coefficient de remplissage de la porosité du sable (quotient de la quantité Q d'eau présente dans une épaisseur z de sable par le volume de la porosité correspondante, est aussi constant et égal à 0,74 seulement : en effet, ce coefficient est $PSz/100\ Q$.

On peut, en écrivant $A = 100\ \alpha\ K/\beta\ P$, évaluer le coefficient α de réduction de la perméabilité : avec $A = 0{,}15$, $K = 0{,}07$, $P = 45{,}4$, $\beta = 0{,}74$, on trouve $\alpha = 0{,}70$. Il est assez surprenant qu'une occupation par l'eau de 74 p. 100 de la porosité s'accompagne d'une réduction aussi importante (70 p. 100 de la perméabilité). En effet, comme, d'une part, l'eau circule au cours de l'infiltration dans les gros capillaires et comme, d'autre part, le débit transmis par un capillaire varie comme le carré de son diamètre, la diminution de perméabilité consécutive au non remplissage temporaire des petits capillaires devrait être moins marquée que ne le prévoit le calcul ci-dessus.

Comme la valeur de A dépend de la valeur de ψ, prise ici égale à 70 cm (ascension capillaire

au bout de 500 heures), on a tenté un nouveau calcul de A en introduisant des valeurs plus basses de ψ : par exemple, avec $\psi = 53$ cm, on obtient $A = 0{,}185$, ce qui donne $\alpha = 0{,}8$. Malheureusement, l'accord entre les valeurs de z calculées et observées est nettement moins bon. Aussi avons-nous conservé $\psi = 70$ cm dans tous les calculs.

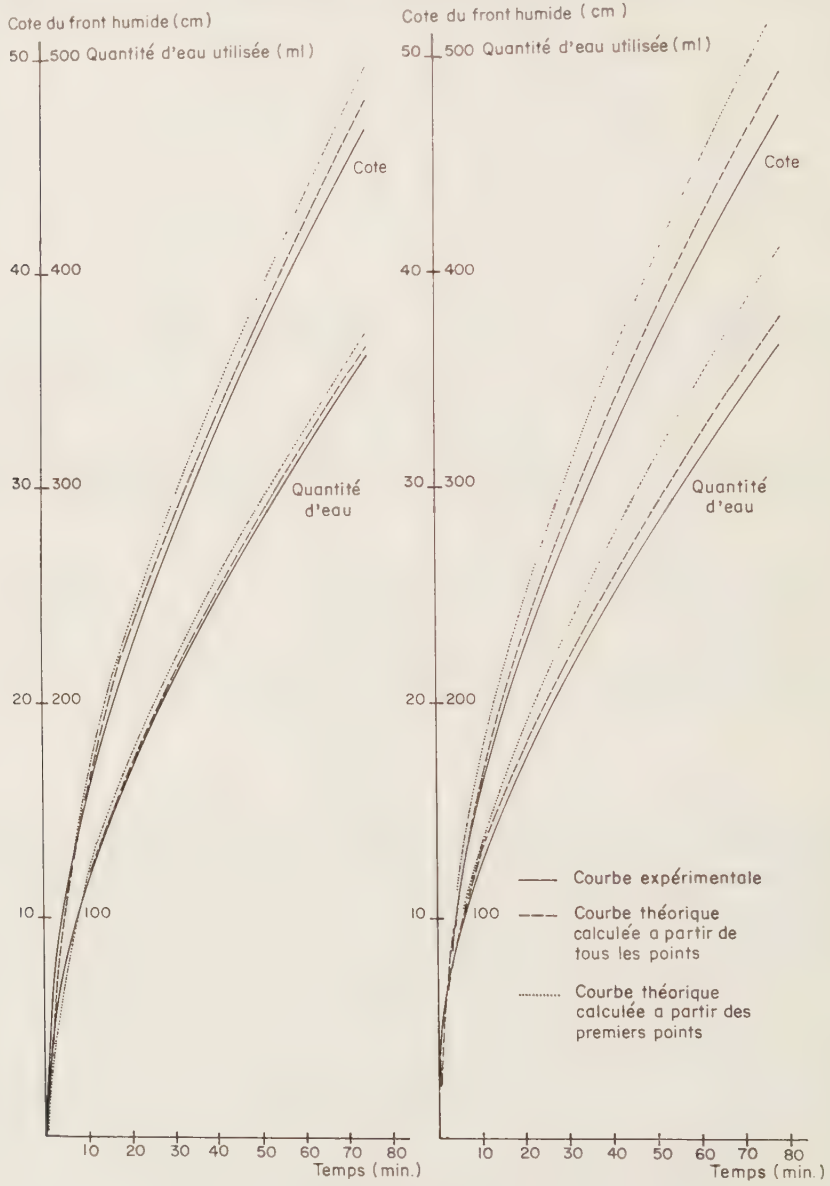


FIG. 6. — *Infiltration. Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées pour la cote du front humide et la quantité d'eau absorbée*

Pour deux tubes contenant seulement du sable, l'erreur relative maxima entre cotes observées et calculées est de 2,7 p. 100 pour une expérience et de 2,3 p. 100 pour l'autre ; la figure 6 montre comment se placent les points correspondants.

Il est intéressant de remarquer qu'une équation transposée de celle rendant compte de l'avancement du ménisque dans un capillaire saturé, décrit la cinétique du front humide dans un

filtre qui n'est pas saturé. Tout se passe comme si un modèle convenable du sable était constitué par un faisceau de capillaires de diamètres différents n'échangeant pas d'eau entre eux. La cote du front humide serait celle des ménisques dans les capillaires les plus larges pour lesquels la vitesse est la plus grande d'après la loi de Poiseuille (cf. 1. 41 et 1. 42) :

$$v = \frac{r^2}{8n} \cdot \frac{dh}{dl} = \frac{r^2}{8n}\left(1 + \frac{a + 2\,T_{EA}/r}{z}\right) = (1/8n)\left[r^2\left(1 + \frac{a}{z}\right) + r\,\frac{2\,T_{EA}}{z}\right]$$

Ceci est cependant surprenant, puisque, en deçà du front humide, les petits capillaires prélèvent une certaine quantité d'eau pour s'humecter.

1. 44. *Possibilité d'extrapolation de la courbe calculée à partir des premiers points expérimentaux.*

Maintenant que nous avons vérifié la validité de l'équation reliant la cote z du front humide au temps t, nous allons examiner si un calcul de A basé sur les premiers points expérimentaux (cf. section 1. 4) est encore valable. La figure 6 montre que l'accord entre le calcul et la réalité est encore convenable, l'erreur relative maxima sur z étant de 11,4 p. 100 pour une expérience et de 4 p. 100 pour l'autre.

Pour étudier l'influence d'un élément grossier sur la dynamique de l'eau dans le sable, on utilisera un seul tube, celui contenant l'élément grossier, dont la partie supérieure sera à la distance z_1 de la surface du sable. L'observation directe fournit la courbe $z - t$ en présence d'éléments. Les points expérimentaux obtenus dans l'intervalle 0, z_1 permettent de calculer l'équation de la courbe $z - t$ qui aurait existé s'il n'y avait pas eu d'élément grossier.

Comme il n'est pas possible de relier au temps t la quantité d'eau utilisée Q, on peut construire la courbe $Q(t)$ en utilisant le fait que le rapport z/Q est sensiblement constant, comme on l'a vu en 1. 43.

1. 5. — *Humectation verticale, sans plan d'eau*

Féodoroff (1965) a montré qu'après une phase initiale, la cote du front humide est proportionnelle au temps. Si z est la cote du front, z_0 la cote atteinte au temps t_0, à partir duquel la vitesse du front V_0 est constante, on a : $z = z_0 + V_0\,(t - t_0)$. Nous avons retrouvé cette relation sur le sable que nous avons utilisé. L'alimentation en eau se fait par un tube effilé, fournissant l'eau goutte à goutte au centre du tube. Nous avons retrouvé, comme Féodoroff (*op. cit*), que les profils hydriques ont en général une humidité constante sauf au voisinage du front humide et à la partie supérieure du tube. Cette humidité qui varie entre 20 et 24 p. 100 correspond à l'occupation de 66 à 71 p. 100 de la porosité.

1. 6. — *Humectation horizontale*

1. 61. *Constatations expérimentales.*

On a suivi le déplacement du front humide dans un tube horizontal transparent alimenté en eau par l'un ou l'autre des dispositifs suivants :

— récipient humectant le sable par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté de porosité n° 1. L'eau du récipient est maintenue sous une légère succion (5 cm d'eau au-dessous de l'axe du tube) pour éviter l'intervention du poids de l'eau (fig. 7 *a*) ;

— tube coudé rempli de sable et plongeant dans un récipient à niveau constant (fig. 7 *b*).

L'abscisse x du front humide, ainsi que la quantité d'eau consommée Q sont proportionnelles à $\sqrt{t}$, sauf au voisinage de l'origine. Les droites représentatives obtenues en portant x ou Q en ordonnée et $\sqrt{t}$ en abscisse ne passent pas par l'origine (fig. 8). Ceci provient en partie du fait qu'avec le premier dispositif d'alimentation, l'instant initial est mal défini, le remplissage du récipient en arrière de la plaque de verre fritté n'étant pas instantané ; de ce fait, la base de la

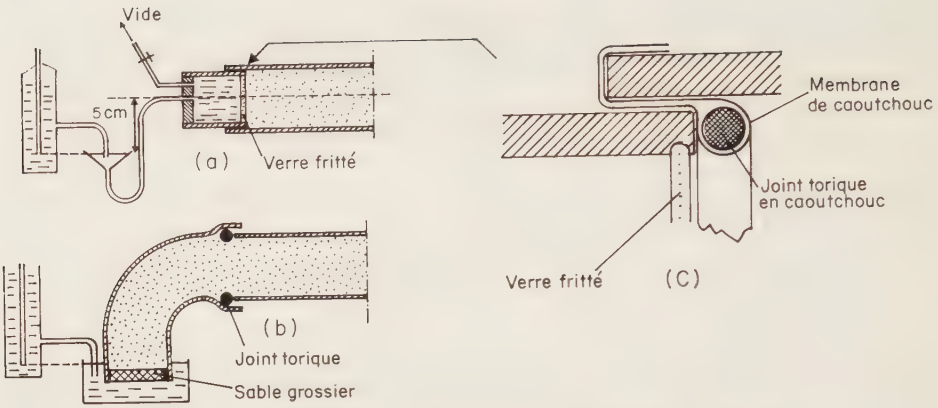


FIG. 7. — *Alimentation en eau dans le cas de l'humectation horizontale*
a : dispositif avec tube portant une plaque de verre fritté ;
b : dispositif avec tube coudé ;
c : détail du dispositif *a* : jonction entre le tube de sable et le tube portant la plaque de verre fritté.

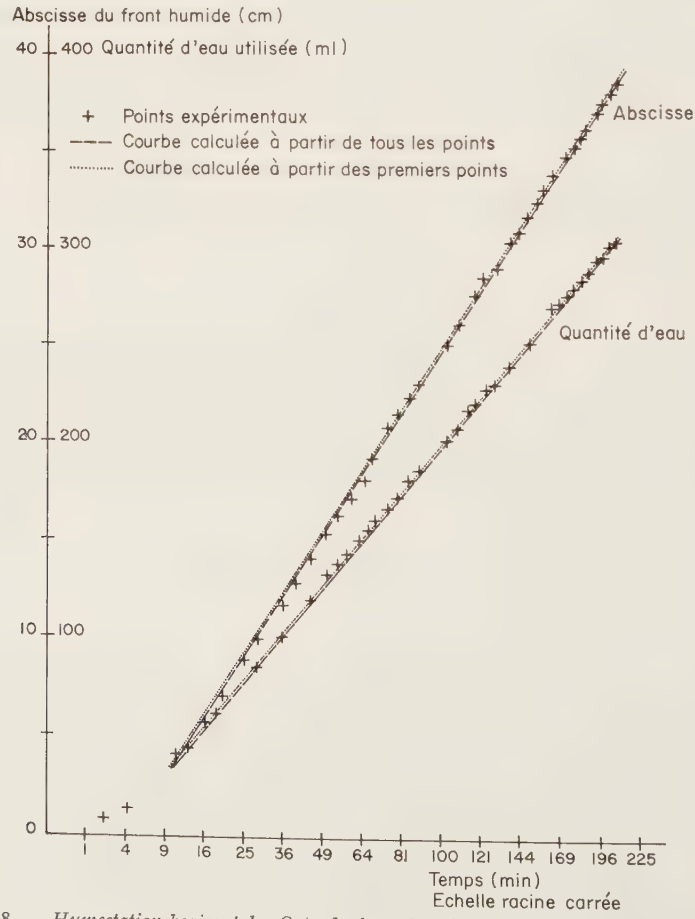


FIG. 8. — *Humectation horizontale :* Cote du front humide et quantité d'eau consommée

plaque, humectée la première, commence à transmettre de l'eau au sol, alors que le haut de la plaque est encore sec. Lorsqu'on utilise un tube coudé, il y a encore une erreur sur l'instant initial, et de plus le front humide n'est pas toujours dans un plan vertical à la sortie du tube coudé.

La forme linéaire des courbes $x = f(\sqrt{t})$ et $Q = g(\sqrt{t})$ se prêtera particulièrement bien à la mise en évidence des perturbations apportées par un élément grossier, et on pourra très facilement évaluer les paramètres de ces droites à partir des premiers points expérimentaux seulement (fig. 8).

Pour suivre l'évolution de l'humidité du sable au cours du temps, nous n'avons pu procéder à des mesures non destructrices (rayon γ par exemple). Nous avons dû, de ce fait, doser l'humidité sur des tubes différents à des époques différentes. On a utilisé des tubes sciés en deux moitiés symétriques, suivant deux génératrices, puis reconstitués en maintenant les deux moitiés accolées par des colliers, du mastic assurant l'étanchéité. Nous avons brusquement arrêté l'alimentation en eau et enlevé le sable sec au-delà du front humide. Ceci permet de doser l'humidité tranche par tranche. La figure 9 représente les profils hydriques mesurés à deux époques différentes ; l'humidité décroît régulièrement lorsqu'on se déplace de la zone d'alimentation au front humide.

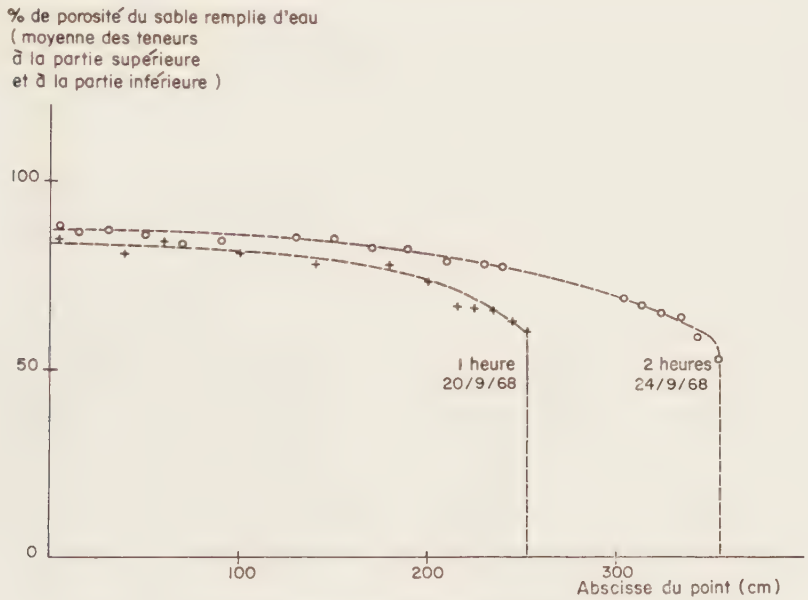


FIG. 9. — *Humectation horizontale : profils hydriques*

1. 62. *Loi d'avancement du front humide.*

Comme la loi théorique d'avancement du front nous sera utile par la suite, nous allons tenter de la retrouver en transposant à un filtre ce qui se passe dans un tube capillaire.

L'eau se déplace sous la seule influence de la pression capillaire :

$$D = \frac{\pi r^4}{8n} \frac{\psi}{x} \qquad D \to 0, \text{ si } x \to \infty$$

$$\pi r^2 \frac{dx}{dt} = \frac{\pi r^4}{8n} \frac{\psi}{x} \qquad \frac{dx}{dt} = \frac{r^2}{8n} \frac{\psi}{x} \qquad x \cdot dx = \frac{r^2}{8n} \psi \cdot dt$$

$$x^2/2 = (r^2/8\,n)\,\psi\,t$$

$$x = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\psi}{n}} \sqrt{t}$$

La transposition donne, pour le milieu poreux :

$$D = KS\,\psi/x$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{100\,K\,\psi}{Px} \qquad x = \sqrt{200\,K\,\psi/P}\,\sqrt{t}$$

Ici, la loi $x = f(t)$ étant relativement simple, on peut établir l'équation reliant la quantité d'eau cumulée Q au temps t

$$D = dQ/dt = KS\,\frac{\psi}{x} = \frac{KS\,\psi}{\sqrt{200\,K\,\psi/P}}\cdot t^{-\frac{1}{2}}$$

$$dQ = \left(KS\,\psi/\sqrt{200\,K\,\psi/P}\right) t^{-\frac{1}{2}}\cdot dt$$

Q_0^t étant la quantité d'eau utilisée entre le temps o et t :

$$Q_0^t = \left(2\,KS\,\psi/\sqrt{200\,K\,\psi/P}\right)\sqrt{t}$$

II. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS NON POREUX SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DU SABLE

Les éléments grossiers non poreux étaient des volumes géométriques taillés dans du plastique rigide : 3 cylindres hauts de 11 cm et ayant des diamètres de 4, 3,7 et 2,7 cm et un parallélépipède à base carrée (côté = 2,6 cm) haut de 4 cm.

Chaque élément a été placé dans le tube plein de sable, de façon que son axe coïncide avec celui du tube. On s'est efforcé de réaliser le même tassement autour de l'élément en utilisant des pistons évidés en leur centre en fonction de la dimension de l'élément. La densité réelle des éléments variant entre 1,4 et 1,5, on pouvait s'attendre à ce que le sable ne soit pas anormalement tassé en dessous d'eux.

2. 1. — *Résultats*

2. 11. *Filtration en tube vertical avec plan d'eau en surface.*

Ces manipulations ont été effectuées soit avec des tubes courts humectés avec précaution par le bas, soit avec des tubes longs humectés par le haut (cf. section 1. 3).

Les quantités d'eau recueillies à la base des tubes ont été pesées, afin de construire les courbes des quantités d'eau cumulées en fonction du temps.

La reproductibilité de ces quantités d'eau, très convenable pour les tubes témoins (cf. section 1.3), devient franchement mauvaise lorsque les tubes contiennent un élément grossier (fig. 10) ; des phénomènes perturbateurs paraissent intervenir de façon aléatoire.

Malgré tout, on constate que la présence d'un élément grossier au sein du sable diminue en général la quantité d'eau transmise par le filtre ainsi constitué. Cette réduction de la quantité d'eau percolée est plus accentuée pour les tubes courts que pour les tubes longs.

Pour relier la diminution de débit à la section des éléments grossiers de même longueur, on examine s'il y a un parallélisme entre le classement par ordre croissant des débits des divers tubes et le classement par ordre décroissant des diamètres des éléments grossiers correspondants. Désignons par C_1 le cylindre de petit diamètre,

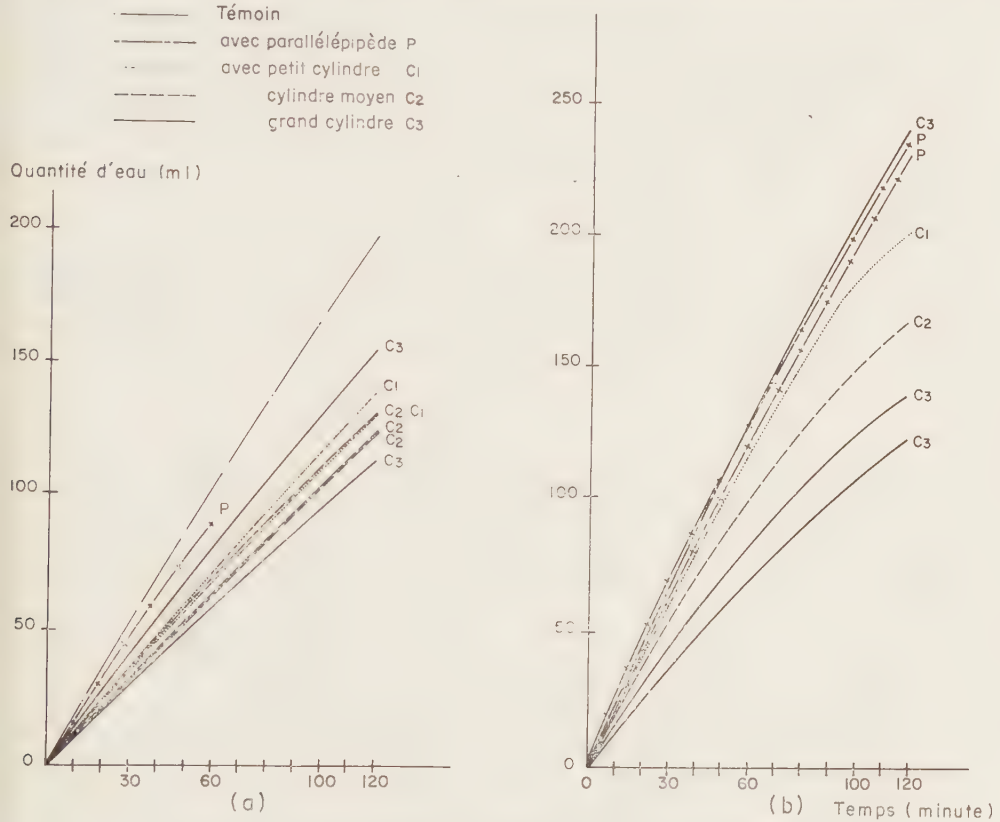


FIG. 10. — *Effet des éléments grossiers non poreux sur la filtration*

a : tubes longs
b : tubes courts

C_2 celui de diamètre intermédiaire et C_3 celui de grand diamètre, et par T le témoin (élément de diamètre nul), et rangeons les débits par ordre croissant. On obtient les séquences :

$C_3\ C_2\ C_2\ C_1\ C_2\ C_1\ T\ T$ pour les tubes longs
$+\ +\ -\ +\ -\ -\ -$

$C_3\ C_3\ C_2\ C_1\ C_3\ T\ T$ pour les tubes courts
$+\ +\ +\ +\ -\ +\ +$

En faisant l'hypothèse que la diminution de débit est d'autant plus accentuée que la section de l'élément grossier est plus grande, on aurait un ordre idéal $C_3\ C_2\ C_1\ T$. Si l'on affecte le signe + à l'objet classé conformément à l'hypothèse ci-dessus et dans le cas contraire, on constate que le classement est assez mauvais : pour les tubes

longs, 1 cas aberrant sur 8 (12 p. 100), pour les tubes courts : 1 cas aberrant sur 7 (14 p. 100).

La forte dispersion des résultats provient vraisemblablement des difficultés considérables que présente la réalisation d'un tassement homogène du sable, en présence d'un élément grossier. Dans ces conditions, les différences de débit constatées peuvent provenir aussi bien de modifications locales de la porosité du sable que de la diminution de section résultant de la présence de l'élément grossier. Le premier effet que l'on n'avait pas l'intention d'étudier résulte d'une perturbation de tassement au cours du remplissage. Comme il n'est pas possible de séparer ses conséquences de celles de la réduction de section provoquée dans un milieu homogène par l'élément grossier, on doit opérer de façon très soignée en rejetant les tubes mal remplis.

2. 12. *Infiltration dans un tube vertical avec plan d'eau en surface.*

Des tubes longs de 52 cm, comportant une épaisseur de sable fin de 48 cm, ont été utilisés. L'élément grossier était placé de façon que sa partie supérieure soit à 20 cm de la surface. Il s'agissait en effet d'avoir suffisamment de points expérimentaux pour évaluer correctement la constante A de l'expression :

$$z + (\psi + a)\ \mathrm{Log}\left[1 + \left(\frac{z}{\psi + a}\right)\right] = \mathrm{A}t.$$

Les détails expérimentaux ont été décrits dans la section 1. 31.

La courbe représentative de la fonction précédente décrit ce que serait la progression du front humide dans ce tube s'il ne contenait pas d'élément grossier ; on déduit de cette progression la quantité d'eau cumulée qui serait utilisée dans ce tube témoin.

Pour déceler l'effet éventuel de l'élément grossier, on compare les courbes obtenues en présence d'élément aux courbes précédentes (fig. 11).

La présence de l'élément apporte les modifications suivantes :

— la vitesse du front humide augmente pendant son passage au niveau de l'élément, puis diminue une fois celui-ci dépassé ;

— le débit d'eau utilisée (mesuré par la pente de la courbe des quantités d'eau cumulées) diminue dès que le front humide parvient au niveau de l'élément.

Les comportements précédents se retrouvent à peu près dans tous les cas (l'augmentation de vitesse du front humide n'est pas visible avec le parallélépipède, certainement à cause de sa faible section) ; mais l'importance des modifications ne suit pas de lois simples, certainement parce que des effets parasites se superposent aux effets étudiés, comme dans la phase de filtration qui suit l'infiltration ; toutes les remarques faites pour la filtration à la section 2. 11 sont donc encore valables ici.

2. 13. *Humectation verticale sans plan d'eau en surface.*

Les expériences ont été conduites dans des tubes cylindriques transparents de diamètre intérieur 5 cm. On a placé, au sein du sable qui les remplissait, un élément grossier non poreux ayant une section carrée ou circulaire constante.

L'alimentation en eau du tube se faisait au goutte à goutte, sans établissement d'un plan d'eau en surface. La quantité d'eau apportée était de 48 ml par heure (ce qui correspond à une lame d'eau de 20 mm par heure). Les débits n'étaient pas rigoureusement les mêmes pour chaque manipulation, les valeurs extrêmes étant 46 et 50.

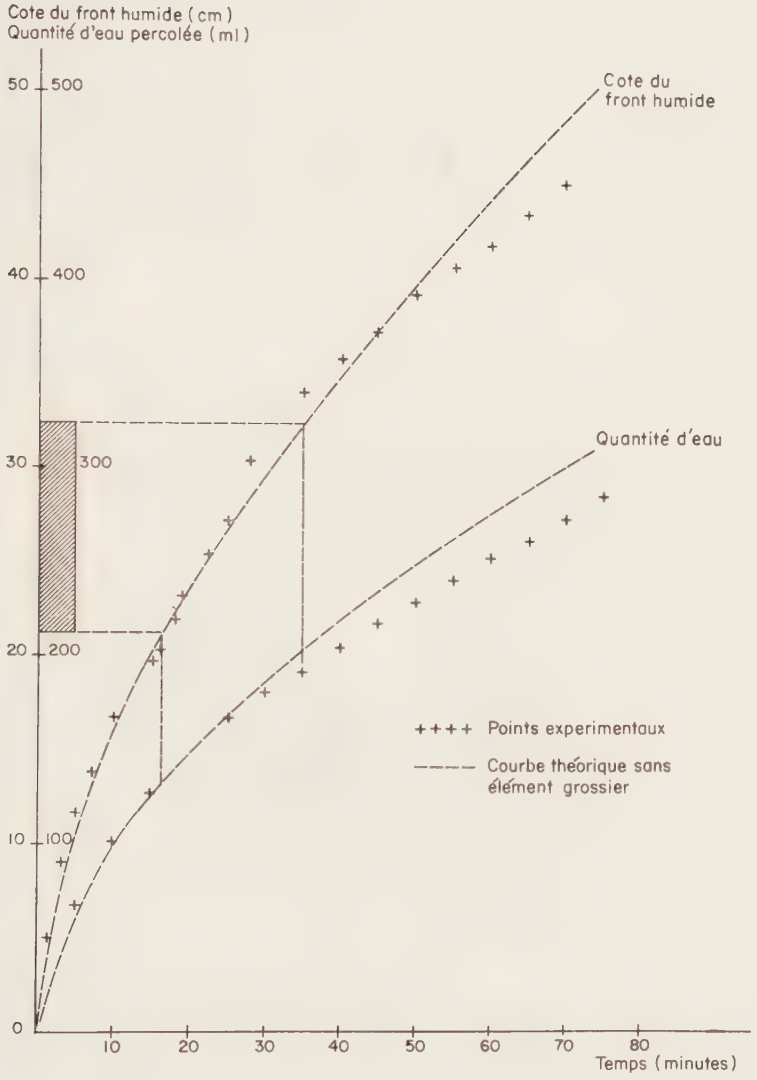


FIG. 11. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'infiltration avec plan d'eau*
Cylindre haut de 11 cm, surface de section : 12,7 cm²

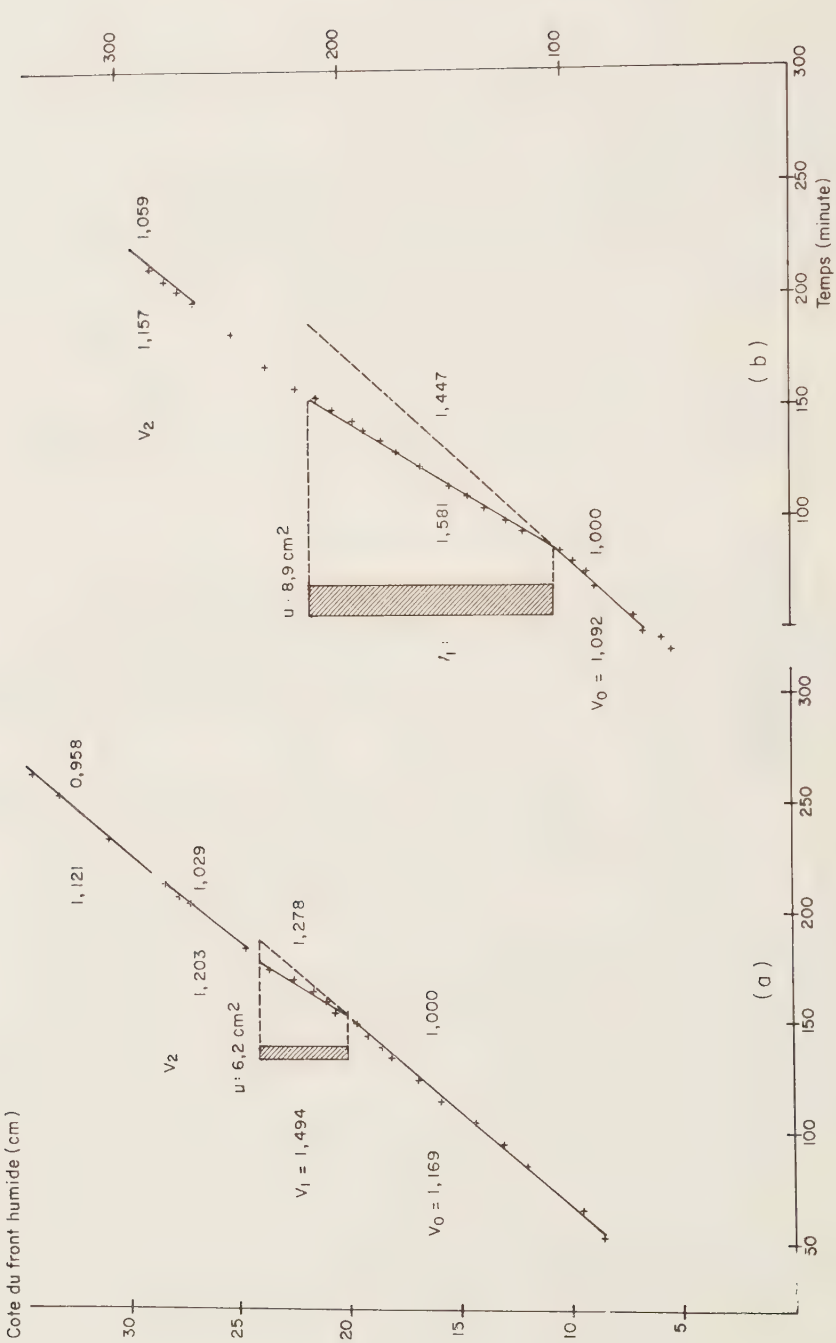


FIG. 12. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau*
a : parallélépipède à base carrée, hauteur 4 cm, section 5,2 cm²
b : cylindre, hauteur 11 cm, section 12,7 cm²

Au cours d'une manipulation, la fluctuation du débit restait inférieure à 4 p. 100. La descente du front humide a été suivie en fonction du temps.

Les graphiques cote du front humide temps (fig. 12) ont sensiblement la même allure. Après une phase d'établissement, le front humide se déplace proportionnellement au temps et donc avec une vitesse V_0 constante. Lorsqu'il passe au niveau de l'élément grossier, le front humide avance à une autre vitesse V_1 constante et supérieure à V_0.

Une fois l'élément rigide dépassé, la vitesse du front humide diminue en général, puis reprend au bout d'un certain temps une vitesse V_2 souvent voisine de V_0. Cette diminution temporaire de vitesse du front s'explique par le fait qu'une partie de l'eau doit humecter, en plus du volume de sable à la périphérie de l'élément grossier, le sable se trouvant sous celui-ci. La figure 13 montre l'allure du front humide observée à travers une paroi de plexiglas.

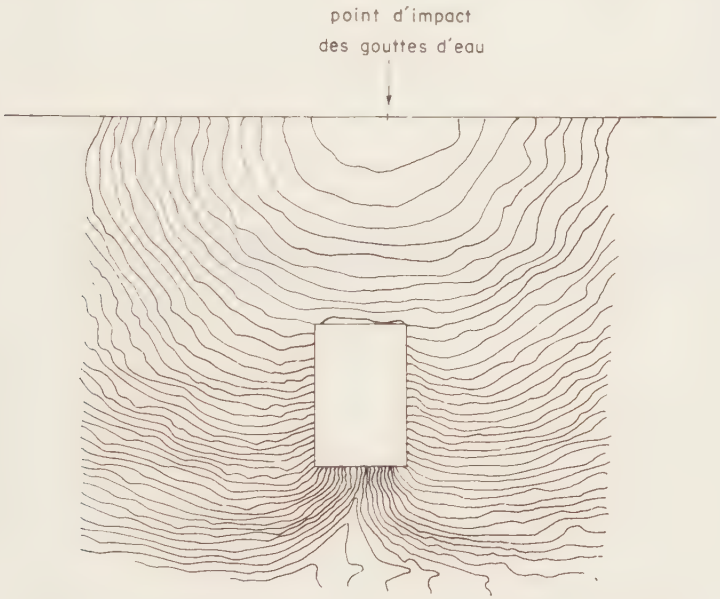


FIG. 13. — *Humectation verticale sans plan d'eau ; aspect du front humide au-dessous de l'élément grossier non poreux*

Les points représentant la position du front humide en fonction du temps se placent sensiblement sur des segments de droite ; nous avons donc calculé les vitesses V_0, V_1, V_2 par ajustement linéaire au moyen de la méthode des moindres carrés. Sur les graphiques, nous donnons, à gauche de chaque segment, la valeur de la vitesse ainsi calculée et, à droite, l'indice correspondant obtenu en faisant $V_0 = 1$ dans tous les cas.

2. 14. *Humectation horizontale.*

La présence d'un élément grossier dans le sable a des conséquences sur le déplacement du front humide et la quantité d'eau cumulée consommée et ceci, quel que soit le mode d'alimentation en eau (par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté

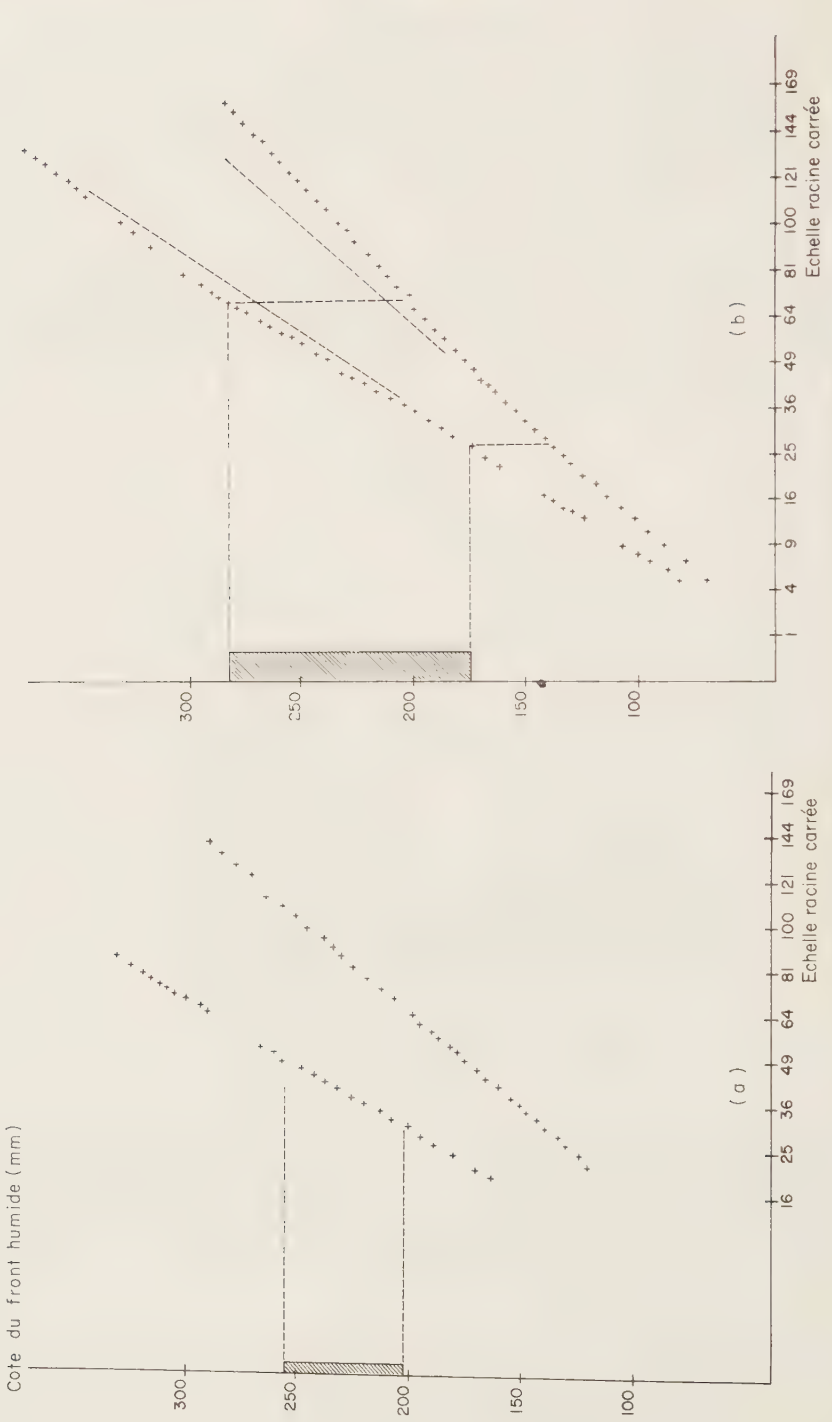


FIG. 14. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation horizontale*
a : parallélépipède à base carrée, hauteur 5,2 cm, section 4 cm²
b : cylindre, hauteur 11 cm, section 5,2 cm²

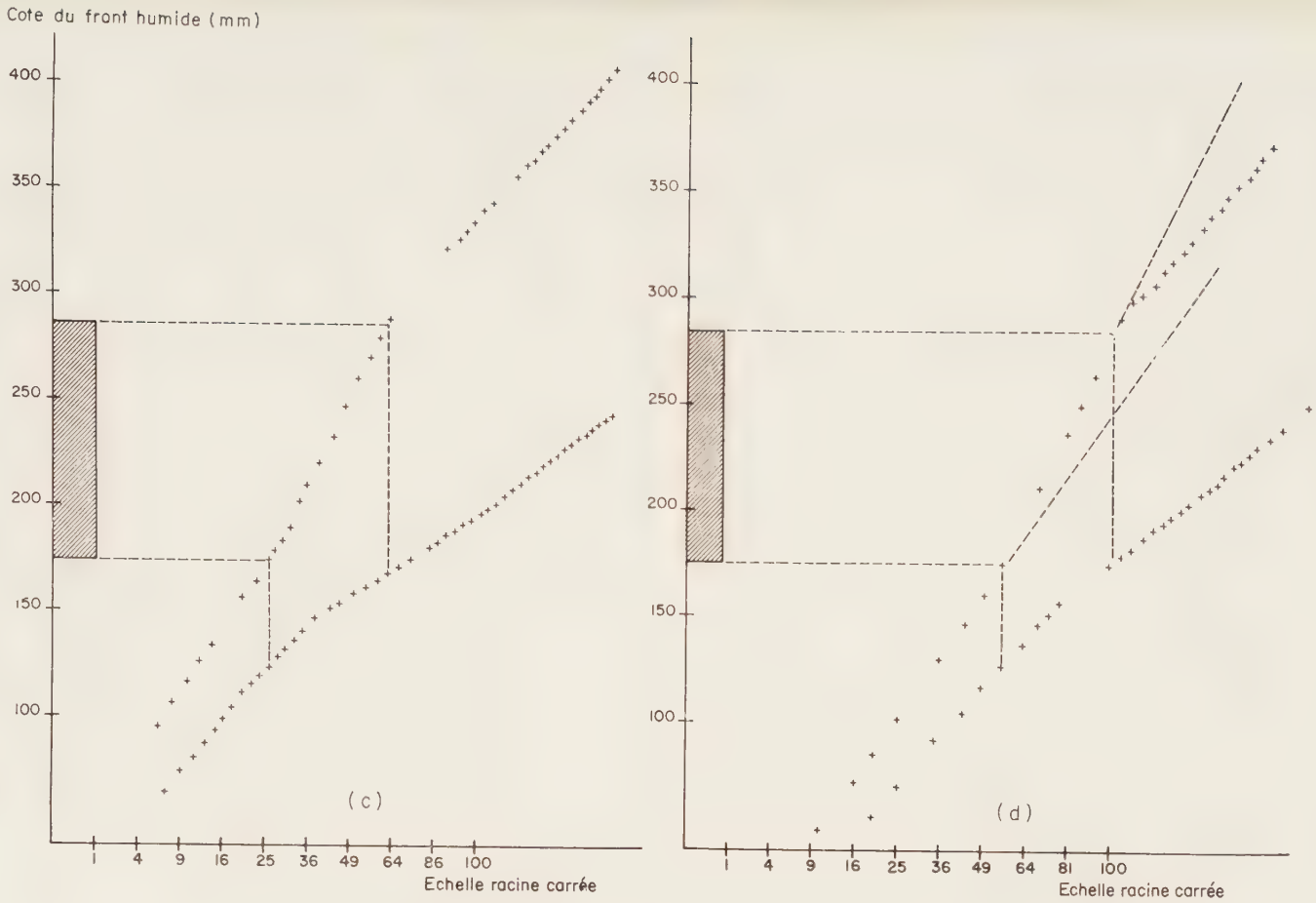


FIG. 14. — *Influence d'élément grossier non poreux sur l'humectation horizontale*
c : cylindre, hauteur 11 cm, section 12,7 cm²
d : cylindre, hauteur 11 cm, section 12,7 cm², alimentation par tube coudé.

ou d'un tube coudé plein de sable). L'examen des graphiques « abscisse du front — racine carrée du temps » permet de le constater facilement (fig. 14) :

— la vitesse du front humide est plus élevée tant qu'il est au niveau de l'élément grossier. Ensuite, elle diminue, le ralentissement étant appréciable quelques centimètres après que le front humide ait dépassé l'élément grossier ;

- le débit d'eau consommée diminue lorsque le front humide a atteint l'élément, et augmente légèrement une fois celui-ci dépassé.

Si l'on considère la répartition de l'humidité dans le tube, il semble que celle-ci soit légèrement supérieure au niveau de l'élément, ce qui se traduit par une déformation des profils hydriques (fig. 15).

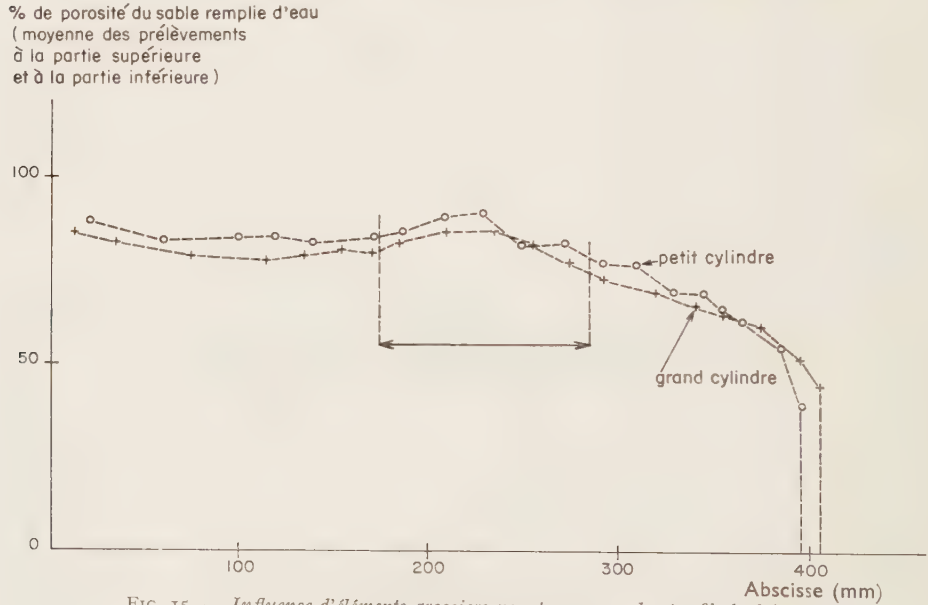


Fig. 15. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur les profils hydriques lors de l'humectation horizontale*

2. 2. — *Essai d'explication. Composition des résistances hydrauliques*

Nous venons de mettre en évidence les modifications apportées à l'écoulement de l'eau dans un sable par la présence de matériaux rigides. Nous allons tenter une explication générale des faits constatés en considérant la résistance offerte par le milieu à l'avancement du fluide.

A cet effet, nous utilisons l'analogie déjà signalée entre la loi d'Ohm et la loi de Darcy : Posons :

Pour la loi d'Ohm :	Pour la loi de Darcy :
i = intensité du courant	D = débit
q = quantité d'électricité	Q = quantité d'eau
R = résistance électrique	
U = différence de potentiel	h = charge hydraulique
s = section, l = longueur, σ = conductivité du conducteur	S = section, l = longueur du filtre
ρ = résistivité = $1/\sigma$	K = coefficient de Darcy

t = temps

Rappelons d'abord que l'intensité du courant dans un conducteur et le débit d'eau à travers un filtre dépendent respectivement du potentiel électrique U/l et du potentiel hydraulique h/l :

La loi d'Ohm s'écrit :

$i = dq/dt = U/R = (\sigma s)\ (U/l)$, formulation analogue à la loi de Darcy $D = dQ/dt = KS\ (h/l)$.

Écrivons la loi de Darcy de façon analogue à $i = U/R$: $D = dQ/dt = h/(l/KS)$, ou, en posant $j = l/KS$: $D = h/j$. Nous appelons j la *résistance hydraulique*.

Comme la loi de Darcy est homologue de la loi d'Ohm, des calculs analogues permettent de composer les résistances hydrauliques ou les résistances électriques.

2. 21. *Filtration.*

Nous allons d'abord établir la formule permettant de calculer la perméabilité du filtre contenant un élément grossier non poreux de hauteur l_2 et de section transversale constante u. Le filtre de section S et de longueur l est rempli d'un matériau de perméabilité K_1 (fig. 16).

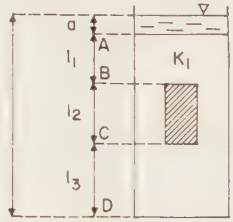


FIG. 16. — *Calcul de la résistance hydraulique d'un filtre contenant un élément grossier non poreux*

On peut trouver la perméabilité Kg du filtre, en écrivant que les pertes de charge s'additionnent (comme les différences de potentiel) le long du filtre :

$$H = h_1 + h_2 + h_3$$

Comme $D = K_1 Sh_1/l_1 = K_1 (S - u)\ h_2/l_2 = K_1 Sh_3/l_3$,
on a $h_1 = Dl_1/K_1S$, $h_2 = Dl_2/K_1 (S - u)$, $h_3 = Dl_3/K_1S$

$H = Dl_1/K_1S + Dl_2/K_1 (S - u) + Dl_3/K_1S$

$D = K_1SH/ (l_1 + l_2S/ (S - u) + l_3)$

En identifiant cette expression avec le débit du filtre complexe de perméabilité K_g : $D = K_g SH\ (l_1 + l_2 + l_3)$, on obtient :

$$K_g = \frac{l_1 + l_2\, S/\ (S - u) + l_3}{K_1\ (l_1 + l_2 + l_3)}$$

On trouve le même résultat en considérant la résistance hydraulique globale J_g du filtre :

$$J_g = J_1 + J_2 + J_3$$

La résistance J_2 s'obtient en composant en parallèle les résistances dues au sable et à l'élément grossier :

$$\frac{1}{J_2} = \frac{1}{l_2/K_1 \cdot (S - u)} + \frac{1}{l_2/o \cdot u}$$

$$J_2 = l_2/K_1\ (S - u)$$

$$J_g = l_1/K_1S + l_2/K_1\ (S - u) + l_3/K_1S$$

Le coefficient de perméabilité global K_g du filtre complexe s'obtiendrait en identifiant les deux membres de l'expression, après avoir posé

$$J_g = \frac{l}{K_gS}$$

Dorénavant, nous composerons directement les résistances hydrauliques, ce qui simplifiera les calculs et les raisonnements.

On retrouve sur l'expression de K_g que :

- lorsque l'élément rigide occupe toute la section du tube : $u = S$ donne $K_g = 0$, la perméabilité globale est nulle ;

- lorsqu'il n'y a pas d'élément rigide, la perméabilité est celle du filtre normal. $u = 0$ donne $K_g = K_1$. La perméabilité est bien celle du filtre sans cailloux.

De ce fait, la fonction $K_g(u)$ étant monotone dans l'intervalle oS, la présence de l'élément rigide non poreux diminue la perméabilité, comme il fallait s'y attendre. On retrouve donc bien qualitativement les constatations expérimentales.

Dans l'expression de J_g, le terme $l_2/K_1\ (S - u)$ montre que l'élément grossier intervient par la diminution de section qu'il provoque et par sa longueur l_2. Pour une section donnée de l'élément grossier, celui-ci aura d'autant moins d'effet sur la perméabilité du filtre que le rapport de la longueur de l'élément à la longueur du filtre sera plus petit. On retrouve donc bien aussi cette constatation expérimentale : la présence d'un élément grossier affecte plus la perméabilité globale des tubes courts que celle des tubes longs.

Nous allons examiner maintenant dans quelle mesure l'application du mode de calcul des résistances hydrauliques équivalentes précédemment présenté permet de rendre compte des différences de débit.

Les débits étant respectivement pour le tube témoin et le tube avec élément D_1 et D_2, on compare le rapport mesuré $(D_1/D_2)_m$ au rapport calculé avec la théorie précédente $(D_1/D_2)_c$.

Comme en fait ces tubes constituent des filtres complexes à cause du sable grossier de la base, on va examiner préalablement si on peut réaliser un calcul simplifié en négligeant la couche de sable grossier. Avec les notations précédemment définies dans les figures 3 et 16 :

$$D_1 = \frac{h + l'}{(1/SK_1)(l_1 + l_2 + l_3) + l'/SK'}$$

$$D_2 = \frac{h + l'}{(1/K_1)(l_1/S + l_2/(S - u) + l_2/S) + l'/SK'}$$

Le rapport $(D_1/D_2)c$ peut s'écrire :

$$(D_1/D_2)c = \frac{S\,(l_1/S + l_2/(S - u) + l_3/S)\,(1 + \varepsilon)}{(l_1 + l_2 + l_3)\,(1 + \varepsilon')}$$

avec $\varepsilon = \dfrac{l'K_1}{K'\,(l_1 + l_2S/(S - u) + l_3)}$ et $\varepsilon' = \dfrac{l'SK_1}{K'\,(l_1 + l_2 + l_3)}$

Le rapport simplifié R s'obtient en faisant $l' = 0$ dans l'expression de $(D_1/D_2)_c$, ce qui entraîne $\varepsilon = \varepsilon' = 0$

$$(D_1/D_2)_c = R\,\frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon'}$$

Pour évaluer l'erreur maxima commise en négligeant ε et ε', nous nous plaçons dans le cas le plus défavorable :

Tubes courts : $l'/(l_1 + l_2 + l_3)$ est le plus grand, cylindre non poreux de petit diamètre : $(S - u)$ sera grand.

Avec : $K_1 = 0{,}07$ cm/mn $K' = 15$ cm/mn

$l_1 = 4$ cm $l_2 = 11$ cm $l_3 = 5$ cm

$S = 21{,}5$ cm² $u = 6$ cm² $S - u = 15{,}5$ cm²

$\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ et $\varepsilon' = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$

$(1 + \varepsilon)/(1 + \varepsilon') \neq 1 + \varepsilon - \varepsilon' \neq 1 - 10^{-3}$

L'erreur introduite en négligeant « l' » étant très largement inférieure à la précision obtenue sur le rapport R simplifié (4,3 et 3,5 p. 100 selon que le tube est long ou court = annexe 5), on conservera l'expression simplifiée que nous désignerons par $(D_1/D_2)_c$.

On a porté sur un graphique, en abscisse $(D_1/D_2)_c$ et en ordonnée $(D_1/D_2)_m$ (fig. 17). La première bissectrice est le lieu des points pour lesquels les variations de débit induites par les éléments grossiers sont égales à celles qui sont expliquées par le calcul des résistances hydrauliques.

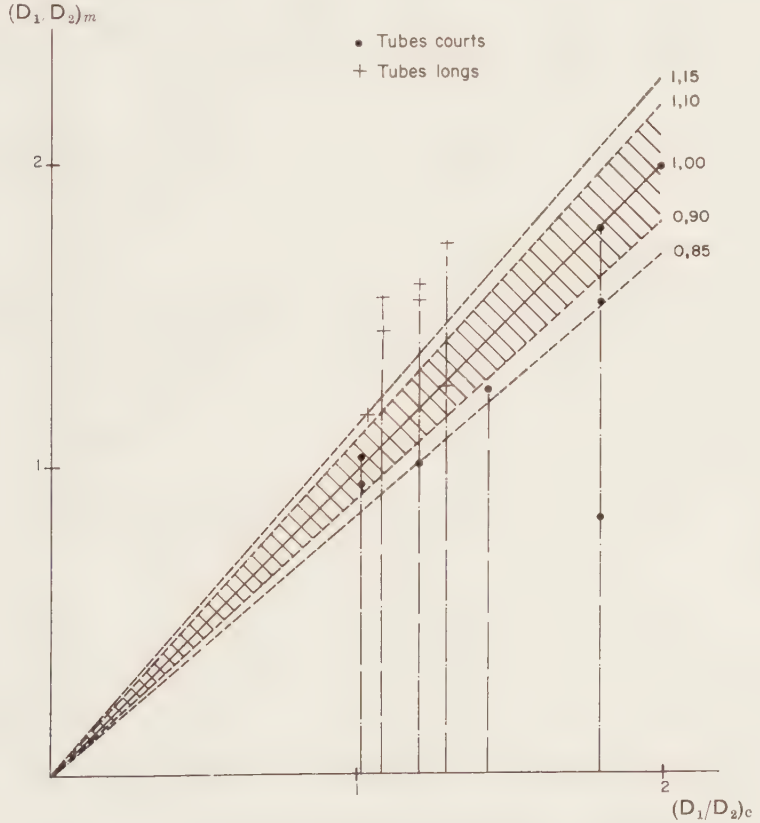


FIG. 17. — *Influence des éléments grossiers non poreux sur la filtration*

Comparaisons entre les rapports de débits mesurés $(D_1/D_2)_m$ et calculés en utilisant la composition des résistances hydrauliques $(D_1/D_2)_c$

D_1 = débit du tube témoin

D_2 = débit du tube contenant un élément grossier

On constate ceci :

— pour les tubes courts humectés avec précaution par le bas, les points sont situés au-dessous de la bissectrice : le calcul surestime la valeur du rapport. En présence d'élément grossier, le débit réel est supérieur au débit calculé ;

— pour les tubes longs, humectés par le haut, c'est l'inverse qui se produit. La diminution de débit est plus forte que celle prévue.

Pour juger de la position des points par rapport à la première bissectrice, on considère les secteurs limités par les droites passant par l'origine de pente 0,85-1,15 et 0,9-1,1.

Dans le secteur 0,85-1,15, on trouve 25 p. 100 des tubes longs et 42 p. 100 des tubes courts. On retrouve les différences déjà signalées entre tubes longs et tubes courts (Section 2. 11). On peut avancer des explications à cet état de fait. Rappelons d'abord qu'il est plus facile de mettre en évidence l'effet d'un élément grossier sur l'infiltration pour un tube court que pour un tube long. La présence d'un élément grossier peut favoriser l'emprisonnement d'air définitif en limitant la section par laquelle l'air peut s'échapper ; cet emprisonnement peut être plus important pour les tubes longs humectés sans précaution. Ces hypothèses n'expliquent pas les mesures aberrantes qui proviennent certainement des difficultés que l'on a pour tasser de façon homogène le sable au voisinage de l'élément grossier.

En conclusion, les perturbations apportées par l'élément grossier, tant à la porosité du sable placé à son voisinage, qu'au remplissage du filtre par l'eau, ne permettent pas de vérifier la validité de l'explication par les résistances hydrauliques.

2. 22. *Infiltration verticale avec plan d'eau.*

Le tube est rempli d'un matériau meuble dont la porosité est P (p. 100 volume apparent) et la perméabilité K_1. Nous allons considérer le déplacement du front humide dans chacun des tronçons AB, BC et CD (fig. 16), en désignant par z_1, z_2, z_3 ses cotes dans ces différents tronçons ; les origines de ces cotes se trouvent respectivement en A, B et C.

Dans le tronçon AB de longueur l_1 et avec les notations définies au début du chapitre, on a :

$$D = \frac{PS}{100}\, dz_1/dt = KS\left(\frac{\psi + a + z_1}{z_1}\right)$$

$$S dz_1/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + z_1}{z_1/K_1 S}$$

On ne simplifie pas par S pour conserver au dénominateur du 2e membre *l'expression complète de la résistance hydraulique*. A partir de maintenant, nous écrirons les équations caractéristiques de chaque situation sous la forme précédente.

Au-delà du point B, pour le tronçon BC, la section utile devient $(S - u)$ et la résistance hydraulique J_2 est la somme de celle du tronçon AB et du tronçon de longueur z_2.

$$(S - u)\, dz_2/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{l_1/K_1 S + z_2/K_1 (S - u)}$$

$$dz_2/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{l_1 (S - u)/K_1 S + z_2/K_1}$$

Pour le tronçon CD, on obtient par un raisonnement analogue :

$$dz_3/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + l_2 + z_3}{l_1/K_1 + l_2 S/K_1 (S - u) + z_3/K_1}$$

On retrouve la vitesse du front humide en l'absence d'obstacle, en écrivant que $u = 0$ dans les deux dernières expressions.

Lorsque le front humide est au niveau de l'élément rigide, il y a accélération par rapport au témoin sans élément, car la résistance hydraulique en présence d'élément : $l_1(S - u)/K_1S + z_2/K_1$ est plus petite que lorsqu'il n'y a pas d'élément : $l_1/K_1 + z_2/K_1$ puisque $(S - u)/S < 1$.

Par contre, après avoir dépassé l'élément, le front humide marque un ralentissement par rapport au tube sans élément. En effet, avec élément, la résistance hydraulique : $l_1/K_1 + l_2S/K_1(S - u) + z_3/K_1$,

est supérieure à ce qu'elle était sans élément :

$$l_1/K_1 + l_2/K_1 + z_3/K_1, \text{ puisque } S/(S - u) > 1.$$

Pour obtenir la loi $z = f(t)$, on intégrera les équations différentielles précédentes dans les intervalles BC et CD seulement, la solution étant déjà connue pour l'intervalle AB.

Ces équations étant analogues, on pose :

Pour l'intervalle BC :	Pour l'intervalle CD :
$A = \psi + a + l_1$	$A = \psi + a + l_1 + l_2$
$B = l_1(S - u)/K_1S$	$B = l_1/K_1 + l_2S/K_1(S - u)$
$C = 1/K_1$	

L'équation prend alors la forme générale :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{100}{P} \cdot \frac{A + z}{B + Cz} \qquad \frac{(B + Cz)\,dz}{A + z} = \frac{100}{P}\,dt$$

$$\frac{B + Cz}{A + z} = \frac{B}{A + z} + \frac{C\,z}{A + z} = \frac{B}{A + z} + \frac{C(A + z - A)}{A + z} = \frac{B}{A + z} + C - \frac{AC}{A + z}$$

Sous cette forme, l'expression peut être facilement intégrée. La valeur de la constante d'intégration est déterminée en écrivant que pour $t = 0$, $z = 0$.

En définitive, on obtient :

— pour le tronçon BC :

$$z_2 + \left[\frac{l_1(S - u)}{S} - (\psi + a + l_1)\right] \operatorname{Log} \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{\psi + a + l_1} = \frac{100\,K_1}{P}\,t$$

— pour le tronçon CD :

$$z_3 + \left[l_1 + \frac{l_2S}{S - u} - (\psi + a + l_1 + l_2)\right] \operatorname{Log} \frac{\psi + a + l_1 + l_2 + z_3}{\psi + a + l_1 + l_2} = \frac{100}{P}\,K_1t$$

Nous avons signalé, dans la section 2. 21, que les difficultés expérimentales compliquaient la mise en évidence de l'effet des éléments grossiers sur la filtration. En particulier, on a constaté que le calcul des résistances hydrauliques ne donnait un accord convenable entre la réalité et l'expérience que pour certains tubes, ce qui constitue un indice de bonnes conditions expérimentales. C'est sur ceux-ci que nous tenterons d'expliquer les modifications de la courbe $z = f(t)$ relative à l'infiltration.

La constante $A = [z - 71 \log (1 + z/71)]\,t^{-1}$ s'évalue à partir des points expérimentaux obtenus avant que le front humide n'ait atteint l'élément grossier ; aussi avons-nous utilisé seulement les résultats des tubes longs, qui permettent, en plaçant

l'élément rigide plus bas, d'avoir plus de points expérimentaux pour le calcul de A.

Nous présentons donc ici les résultats concernant deux tubes longs pour lesquels l'accord entre la théorie et l'expérience est convenable en percolation.

Sur la figure 18, on constate un accord très satisfaisant entre les cotes mesurées et calculées. Pour le même tube, l'accord est excellent entre les débits mesurés et calculés. Ces constatations montrent que le calcul de la résistance équivalente permet de rendre compte de l'effet des éléments grossiers d'une façon quantitative. Sur la figure 19, on constate que l'accord est déjà moins bon, ce qui correspond également au fait que, pour cette expérience, les débits prévus en filtration ne sont pas très proches des débits réels.

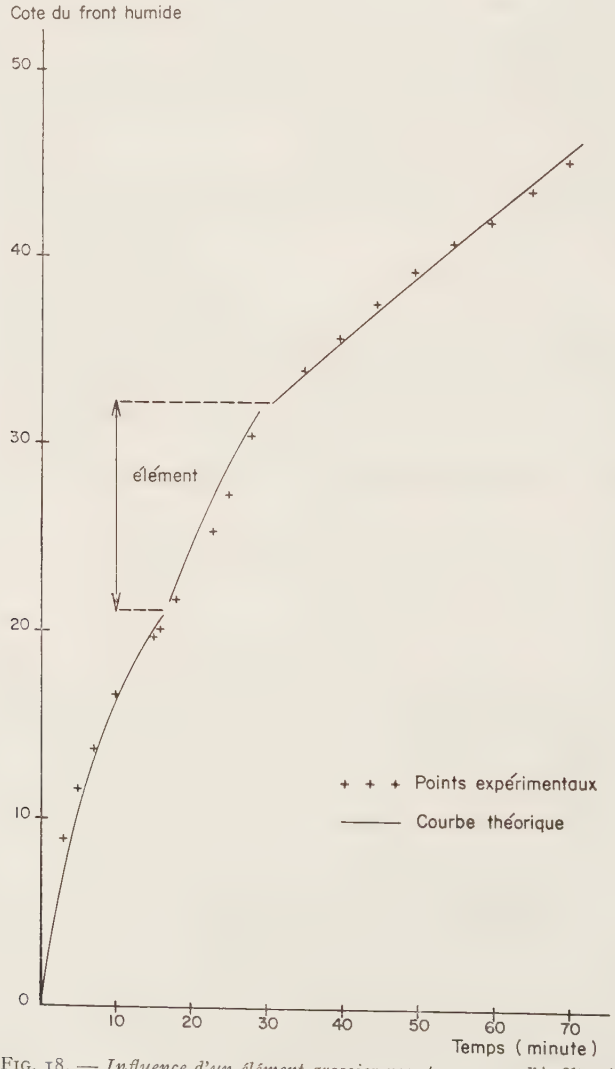


FIG. 18. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'infiltration*

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition des résistances hydrauliques ; cylindre, hauteur 11 cm et 12,7 cm² de surface de section.

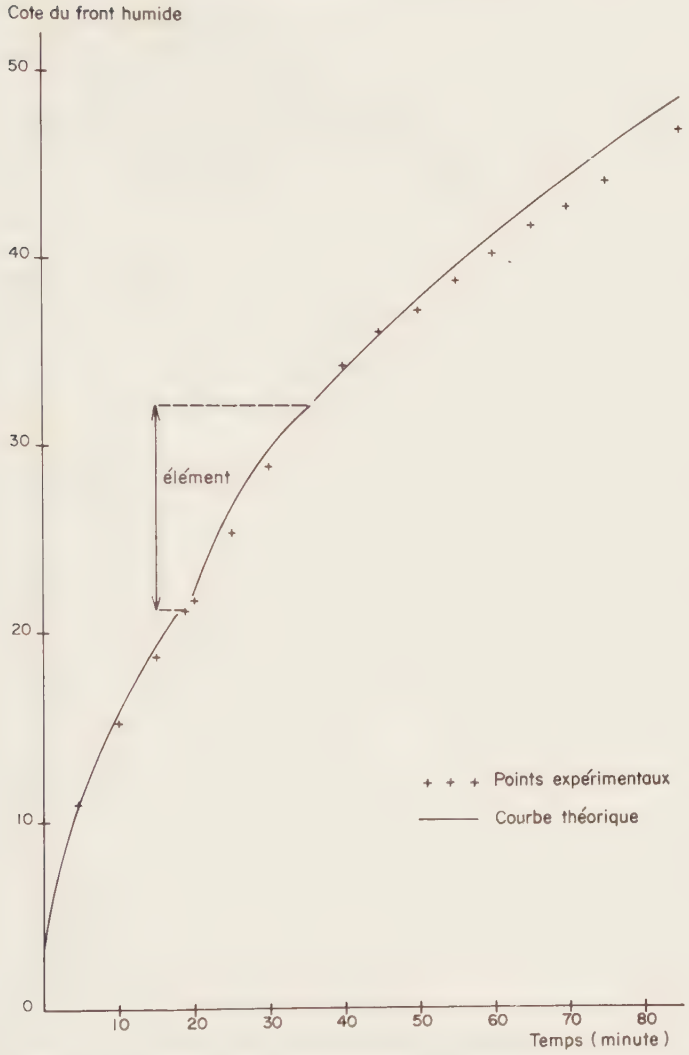


FIG. 19. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'infiltration*

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition des résistances hydrauliques ; cylindre, hauteur 11 cm et 10,7 cm² de surface de section.

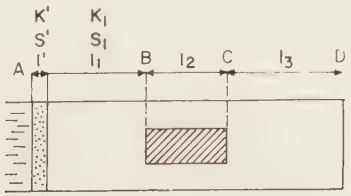


FIG. 20. — *Calcul de la formule de déplacement du front humide en humectation horizontale : alimentation par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté*

2. 23. *Humectation horizontale.*

Les formules donnant l'abscisse du front humide x en fonction du temps t seront établies dans les deux cas d'alimentation en eau.

Lorsque celle-ci se fait par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté de perméabilité K', de section S' et de longueur l' (fig. 20), on a :

— pour le tronçon AB :

$$S(dx_1/dt) = (100\ \psi/P)\ \frac{1}{l'/K'S' + x_1/K_1S}$$

Après séparation des variables et intégration :

$$2x_1\ (l'K_1/K') + x_1^2 = (200\ K_1\ \psi/P)t$$

— pour le tronçon BC correspondant au niveau de l'élément :

$$(S - u)(dx_2/dt) = (100\ \psi/P)\ \frac{1}{l'/K'S' + l_1/K_1S + x_2/K_1(S - u)}$$

$$dx_2/dt = (100\ \psi/P)\ \frac{1}{l'\ (S - u)/K'S' + l_1(S - u)/K_1S + x_2/K_1}$$

En comparant cette vitesse à celle qui existerait en l'absence d'élément (obtenue en faisant $u = 0$ dans l'expression), on constate que la vitesse du front humide augmente au niveau de l'élément, puisque $(S - u)/S' < S/S'$ et $(S - u)/S < 1$.

Par intégration, on obtient :

$$2x_2\ (K_1\ l'\ (S - u)/K'S' + l_1\ (S - u)/S) + x_2^2 = (200\ K_1\ \psi/P)t$$

— pour le tronçon CD, on aurait de même :

$$S(dx_3/dt) = (100\ \psi/P)\ \frac{1}{l'/K'S' + l_1/K_1S + l_2/K_1\ (S - u) + x_2/SK_1}$$

La vitesse est inférieure à ce qu'elle serait sans élément, puisque $S/(S - u) > 1$.

$$2x_3\ (K_1l'S/K'S' + l_1 + l_2S/(S - u)) + x_3^2 = (200\ K_1\ \psi/P)t$$

Lorsque le tube horizontal est alimenté par un tube coudé de section S, de longueur moyenne l', la charge qui intervient est $\psi - h$, h étant la différence de cote entre le niveau du plan d'eau et l'axe du tube (fig. 21).

— Pour AB :

$$S(dx_1/dt) = (100/P)\ \frac{\psi - h}{l'/K_1\ S + x_1/K_1\ S}$$

d'où : $2\ x_1\ (l'/S) + x_1^2 = (200\ K_1\ (\psi - h)/P)\ t$

— Pour BC :

$$2x_2\ (l'(S - u)/S + l_1\ (S - u)/S) + x_2^2 = (200\ K_1\ (\psi - h)/P)\ t$$

— Pour CD :

$$2x_3\ (l' + l_1 + l_2S/(S - u)) + x_3^2 = (200\ K_1\ (\psi - h)/P)\ t$$

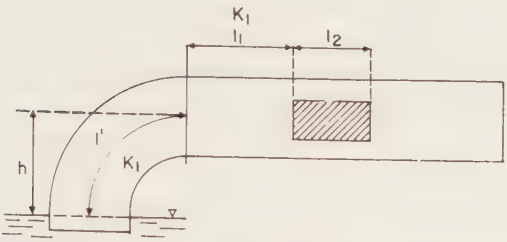


FIG. 21. — *Calcul de l'équation de déplacement du front humide en humectation horizontale, alimentation par un tube coudé*

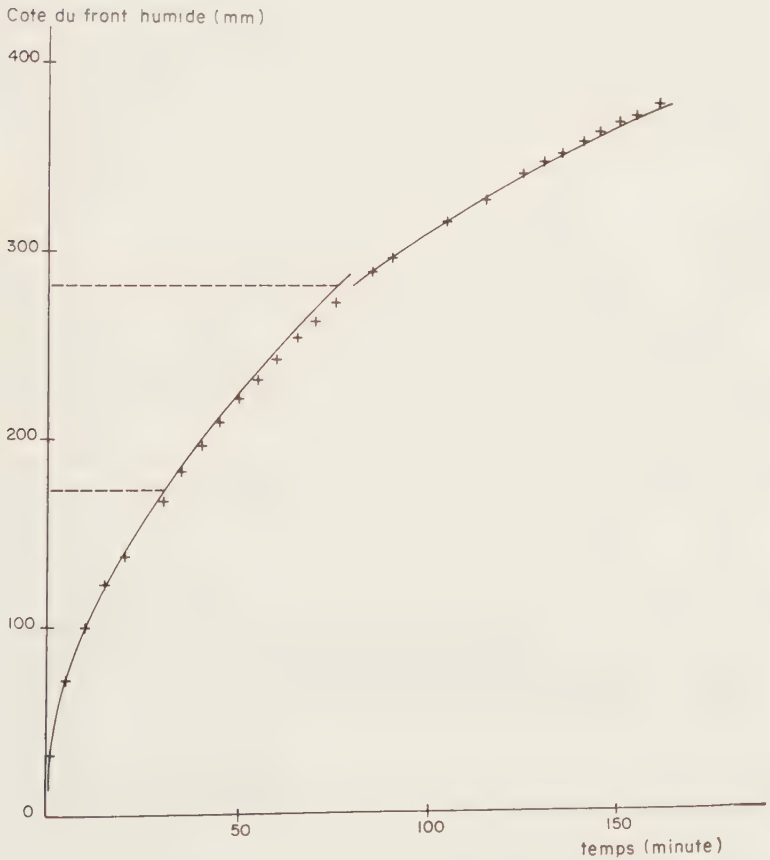


FIG. 22. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'humectation horizontale*

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition de résistances hydrauliques; cylindre de 11 cm de hauteur et de 5,9 cm² de surface de section.

Les figures 22 et 23 montrent que l'accord est convenable entre calcul et observation. On remarquera que dans cette série de manipulations l'accord avec la théorie est beaucoup plus satisfaisant qu'avec les autres séries.

Comme il ne paraît pas *a priori* y avoir de raison pour que l'homogénéité de remplissage soit meilleure dans ces manipulations, on peut penser qu'il y a un moindre emprisonnement d'air dû à la progression plus lente du front humide.

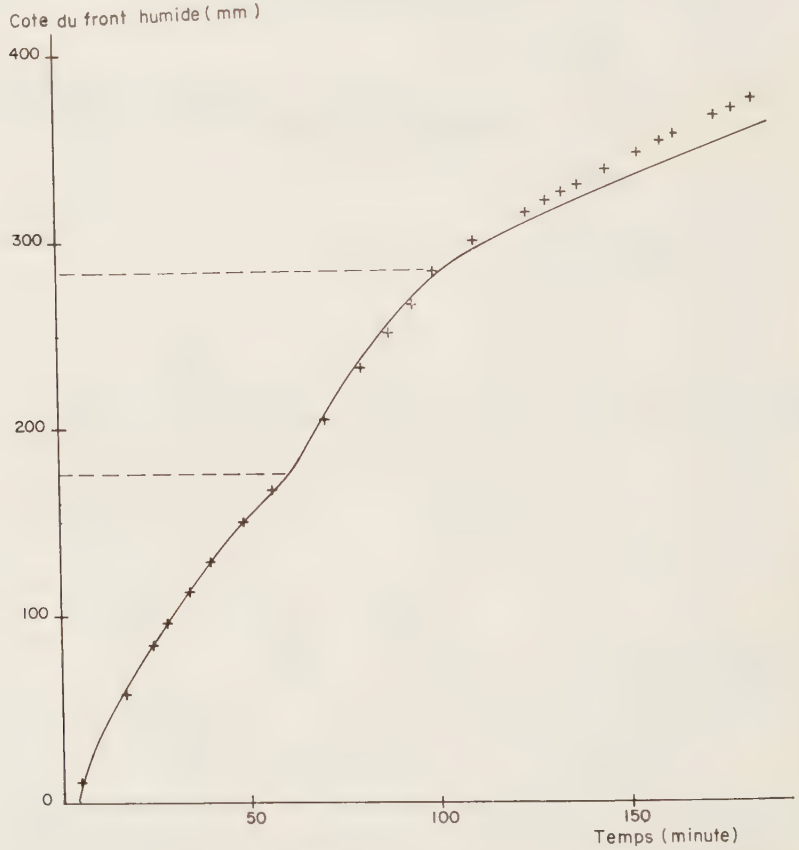


FIG. 23. — *Influence d'un élément grossier non poreux sur l'humectation horizontale*
Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition de résistances hydrauliques ; cylindre haut de 11 cm et de 12,7 cm² de surface de section.

2. 3. — *Essai d'explication dans le cas de l'humectation verticale sans plan d'eau*

On ne peut utiliser ici les lois de l'hydrodynamique en les transposant du capillaire au filtre, puisqu'elles donneraient une loi z — t curviligne, ce qui est en contradiction avec les résultats expérimentaux.

Nous avons donc tenté une explication plus directe, fondée sur des considérations géométriques.

Rappelons qu'on peut distinguer trois vitesses d'avancement du front humide :

V_0 vitesse du front humide avant son passage au niveau de l'élément grossier ;
V_1 vitesse au niveau de l'élément grossier ;
V_2 vitesse après que le front humide ait dépassé l'élément grossier.

Ces vitesses sont sensiblement constantes pour chacun des intervalles. Nous avons tenté de relier les rapports $V_1V_0^{-1}$ et $V_2V_0^{-1}$ au rapport des sections de tube occupées par le sable : si S est la section intérieure du tube et u la section de l'élément grossier, la section occupée par le sable est S en l'absence d'élément et $(S - u)$ en présence d'élément. Nous avons considéré le rapport inverse $S(S - u)$, puisque la vitesse augmente lorsque la section diminue. V_0, V_1 et V_2 sont les pentes des différents segments de la courbe $z = f(t)$. Ces pentes ont été évaluées par la méthode des moindres carrés en n'utilisant que les parties rectilignes de cette courbe, ce qui exclut les portions de courbe correspondant à l'établissement des vitesses constantes V_0 et V_2.

La figure 24, représentant la variation de $V_2 \cdot V_0^{-1}$ en fonction de $S \cdot (S - u)^{-1}$, indiquerait une légère tendance à la diminution de la vitesse V_2. Cependant, la pente négative de la droite de régression est inférieure à 0,1, la régression n'étant pas significative. On peut donc admettre en première approximation que la présence d'un

FIG. 24. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau*

(V_0) Vitesse du front humide avant le passage au niveau de l'élément, après le passage de l'élément (V_2)
S : section intérieure du tube
u : section de l'élément

élément grossier ne diminue pas sensiblement la vitesse du front humide une fois que celui-ci a dépassé l'élément grossier. Si l'on admet, en outre, qu'excepté au voisinage du front humide où existe un gradient net d'humidité, celle-ci est sensiblement la même dans la colonne, la présence de l'élément grossier ne modifie pas à son niveau le débit transmis. Il faut donc qu'au passage de l'élément grossier, il y ait un ou des mécanismes de compensation assurant un débit constant.

Le graphique 25 suggère une relation curviligne croissante entre $V_1V_0^{-1}$ et $S \cdot (S - u)^{-1}$, ce qui traduit l'augmentation de vitesse au niveau de l'élément grossier. La courbe traduisant la liaison précédente doit passer par le point de coordonnées 1,1. En effet, lorsque $u \to 0$, $V_1 \to V_0$, ce qui entraîne $V_1V_0^{-1} \to 1$, et $S(S - u)^{-1} \to 1$. Pour l'ensemble des points expérimentaux et du point de coordonnées 1,1, on peut calculer une régression linéaire hautement significative ($P : 0{,}01$) entre $V_1V_0^{-1}$ et $\log [S \cdot (S - u)^{-1}]$:

$$V_1V_0^{-1} = 1{,}374 \log [S \cdot (S - u)^{-1}] + 1{,}121,$$

relation valable pour le sable utilisé et le débit indiqué précédemment. Il est vraisemblable que si la courbe ainsi ajustée ne passe pas par le point de coordonnées 1, 1, c'est à cause de l'ajustement imposé. La courbe représentative peut en première approximation, être assimilée, pour $1 < S/(S - u) < 1{,}5$ à la première bissectrice : $V_1 V_0^{-1} = S.\ (S - u)^{-1}$ ou $V_1(S - u) = V_0 S$, formulation rappelant celle de l'équation de continuité.

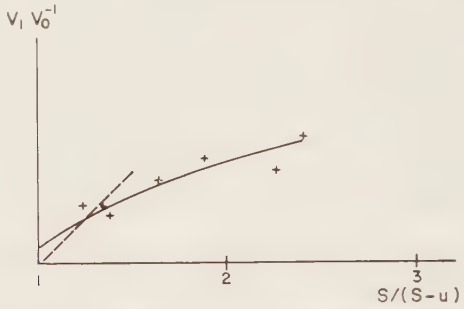


Fig. 25. — *Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau*

Vitesse du front humide avant le passage au niveau de l'élément (V_0), sur niveau de l'élément (V_1)
S : section intérieure du tube
u : section de l'élément

On peut indiquer la nature des mécanismes compensateurs assurant la constance du débit. Tant que la réduction de la section utile est faible, la quantité d'eau transmise par le sable dans l'unité de temps est maintenue constante par l'augmentation de la vitesse V_1 du front humide, ce qui doit se traduire par une augmentation de la vitesse de l'eau dans les capillaires. Mais pour maintenir un débit constant lorsque $S \cdot (S - u)^{-1} > 1{,}5$, la vitesse V_1 croît moins que ne l'implique la diminution de section ; il faut alors imaginer un autre mécanisme pour que le débit reste constant. Peut-être l'eau circule-t-elle dans une fraction plus importante de la porosité totale.

III. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS POREUX SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU

Placé dans un sable en voie d'humectation, un élément grossier poreux peut se comporter de façon différente au cours de l'humectation du système sable - élément grossier :

— avant d'être lui-même saturé d'eau, l'élément grossier peut absorber de l'eau à cause de la succion qu'il exerce ; il retarde ainsi l'humectation du sable ;

— une fois saturé, l'élément grossier peut, du moins théoriquement, transmettre l'eau au sable qu'il contribue alors à humecter.

Pour un élément grossier donné, l'importance de l'absorption et de la transmis-

sion est en quelque sorte inverse : des pores étroits ont pour conséquence une succion élevée, qui va de pair avec une faible perméabilité.

Par ailleurs, les conséquences de ces mécanismes sur l'humectation du sable dépendent aussi des valeurs relatives de la succion du sable et de celle de l'élément rigide, et il en va de même pour les perméabilités.

Nous avons donc porté notre attention sur des éléments rigides de propriétés différentes : un cylindre de craie de 4 cm de diamètre, haut de 5,3 cm, un prisme à base carrée (2,6 cm × 2,6 × 4 cm) constitué de billes de verre agglomérées d'un diamètre compris entre 1 000 et 1 250 μ. On a utilisé aussi un cylindre de calcaire à milioles (diamètre 4 cm, hauteur 6,8 cm), qui présente la particularité de s'humecter lentement.

Nous donnons, dans le tableau 1, les caractéristiques de ces matériaux.

TABLEAU I

Caractéristiques des matériaux poreux rigides

	Succion, exprimée en hauteur d'ascension capillaire (cm)	Coefficient K de Darcy ($cm \cdot mn^{-1}$)
Craie	2 200 (1)	0,000 9 à 0,003 (2)
Calcaire à milioles	1,8	0,0003 2 (3)
Massif de billes de verre	2,5 (1)	15,5

(1) Valeur théorique calculée.

(2) Valeurs approximatives, la perméabilité de la craie ne suivant pas la loi de DARCY (Annexe 6).

(3) Matériau contenant certainement de l'air lors de la mesure.

Rappelons que la perméabilité du sable est de 0,07 cm/mn et sa succion 70 cm d'eau.

Les modifications de la cinétique du front humide induites dans le sable par les divers éléments grossiers ont été étudiées en utilisant le dispositif déjà décrit de tubes pleins de sable, longs de 48 cm (Section 1. 1).

Par ailleurs, on a observé les déplacements relatifs des fronts humides dans le matériau grossier et le sable au moyen d'un dispositif spécial que nous décrirons par la suite.

3. 1. — *Résultats des expériences*

3. 11. *Filtration en tube vertical avec plan d'eau.*

Les tubes ont été humectés par le haut, en établissant rapidement une lame d'eau, dont l'épaisseur (1 cm) était maintenue constante à l'aide d'un vase de Mariotte. Le débit a été mesuré par pesée de l'eau recueillie à la base du tube.

Les quantités d'eau percolée lorsque le tube contient un cylindre de craie ou de calcaire à milioles sont inférieures à celles du tube témoin plein de sable.

Dans le cas du prisme de billes de verre, on a utilisé des tubes très courts pour que l'effet de ce prisme sur la résistance hydraulique soit appréciable (cf. Section 2.21). Comme le sable a tendance à remplir les espaces entre les billes, tant au moment du remplissage avec du sable sec qu'au cours de la percolation de l'eau, le système sable massif de billes est instable. On a limité cet inconvénient en coiffant la partie supérieure de l'élément par de la toile à bluter. Mais même lorsque le tube est humecté avec précaution par la base (cf. Section 1.31), il est extrêmement

difficile de remplir d'eau le massif de billes de verre. On pouvait imaginer que le sable était peut-être humecté par capillarité au voisinage du massif de billes de verre avant que le plan d'eau libre soit parvenu à son niveau (le sable est peu perméable), emprisonnant ainsi de l'air dans le prisme de billes de verre. On a donc modifié la façon de remplir le tube de sable : on élève successivement le niveau du sable, puis le niveau de l'eau, ce qui revient à jeter le sable dans l'eau. Comme les grains de sable s'arrangent d'une façon différente de celle du remplissage à sec, la perméabilité du filtre ainsi constitué diminue : 0,037 cm/mn au lieu de 0,07. La perméabilité a été calculée à partir du débit d'un filtre complexe comprenant 9,5 cm de sable de Fontenay surmontant 2 cm de sable grossier de perméabilité K′ connue.

La comparaison des débits des tubes témoins et de ceux contenant un prisme de billes de verre montre que la présence de ce dernier augmente le débit, lorsqu'on prend les précautions particulières ci-dessus pour le remplir d'eau.

3. 12. *Infiltration en tube vertical avec plan d'eau.*

On utilise la phase infiltration de l'expérience précédente. Le déplacement du front humide est suivi par l'enregistrement de sa cote z en fonction du temps t. La courbe $z = f(t)$ est représentée sur les figures 26, 27 et 28. Pour mieux juger de l'influence éventuelle du corps poreux, on a placé sur la même figure la courbe du déplacement du front humide en l'absence d'élément. Comme nous l'avons vu, cette courbe est construite par extrapolation, à partir des points expérimentaux obtenus avant que le front humide dans le sable soit arrivé au niveau de l'élément grossier.

Craie. — Lorsqu'il a atteint le niveau du cylindre de craie, le front humide dans le sable avance en moyenne moins vite que dans le témoin. Une fois que la cote de la base du cylindre de craie a été dépassée par le front humide, sa vitesse moyenne est inférieure à celle qui existerait en l'absence d'élément. Un examen détaillé révèle une diminution de vitesse plus accentuée juste après le passage au niveau de la craie. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue dès que le front humide parvient à la partie supérieure de l'élément rigide.

Calcaire à milioles. — Le déplacement du front humide du sable au niveau du cylindre de calcaire à milioles est différent de celui de la craie : la vitesse augmente comme si l'élément n'était pas poreux (cf. Section 2. 12). Cette différence entre la craie et le calcaire à milioles s'explique en partie par la comparaison des quantités d'eau qu'ils ont absorbées : exprimées en cm^3 d'eau pour 100 cm^3 de volume apparent, elles sont de 11,1 et 40,2 pour le calcaire à milioles et la craie respectivement. Une fois l'élément dépassé, le front humide avance moins vite comme dans le cas de la craie. Il y a également ici diminution de la quantité d'eau fournie au dispositif comme pour la craie.

Massif de billes de verre. — La cinétique du front humide est analogue à celle du calcaire à milioles : la vitesse augmente au niveau du massif comme si l'élément n'absorbait pas d'eau ; on n'a effectivement pas trouvé dans l'élément une quantité d'eau appréciable à la fin de l'expérience.

Indiquons enfin qu'on a aussi fait des expériences avec des parallélépipèdes de brique et de verre mousse.

Les effets des éléments grossiers sur la cinétique du front humide du sable au voisinage de l'élément peuvent se résumer ainsi :

— une diminution de la vitesse moyenne pour la craie et la brique, qui exercent une forte succion et s'humectent rapidement ;

— une augmentation de la vitesse moyenne pour le calcaire à milioles, le verre

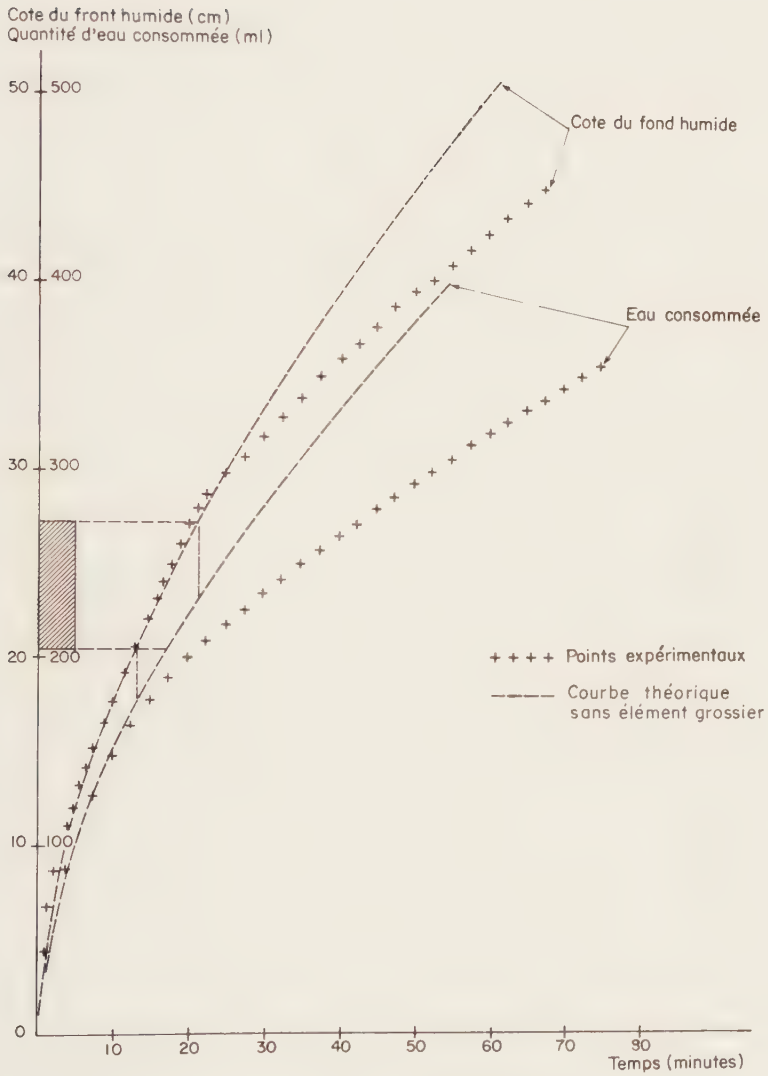


FIG. 26. — *Influence d'un cylindre de calcaire à millioles* (hauteur : 6,8 cm surface de section : 12,5 cm²) *sur l'infiltration avec plan d'eau*

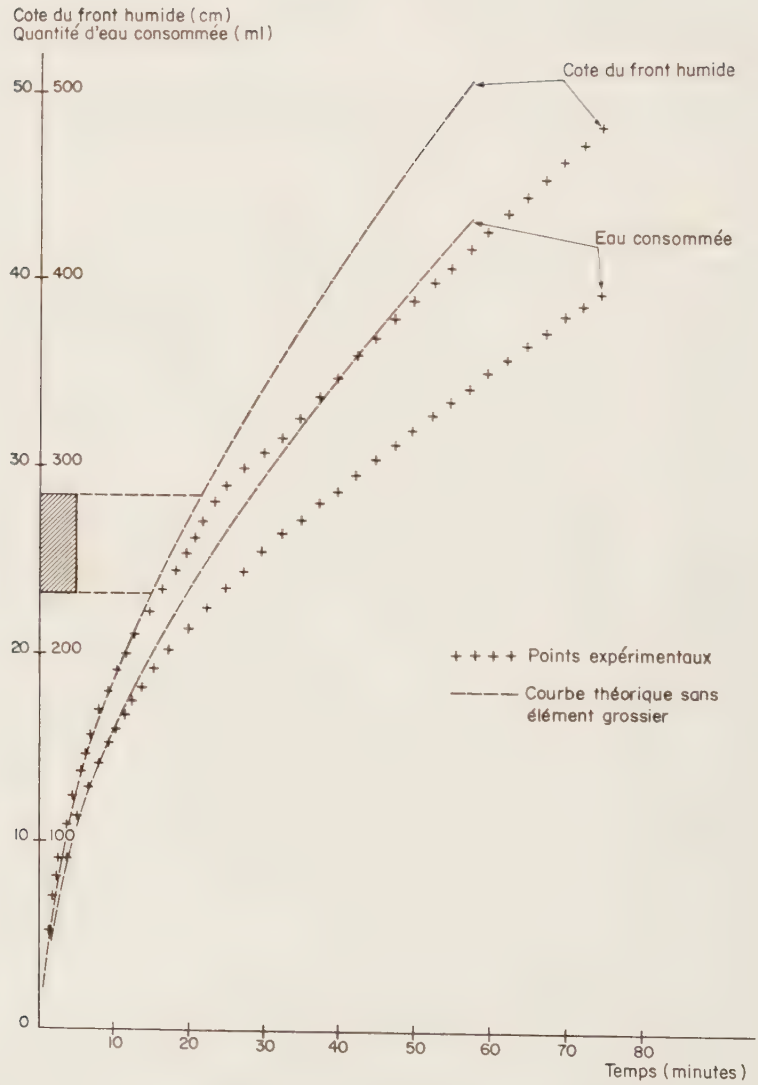


FIG. 27. — *Influence d'un cylindre de craie* (hauteur : 5,3 cm, surface de section : 12,5 cm²) *sur l'infiltration avec plan d'eau*

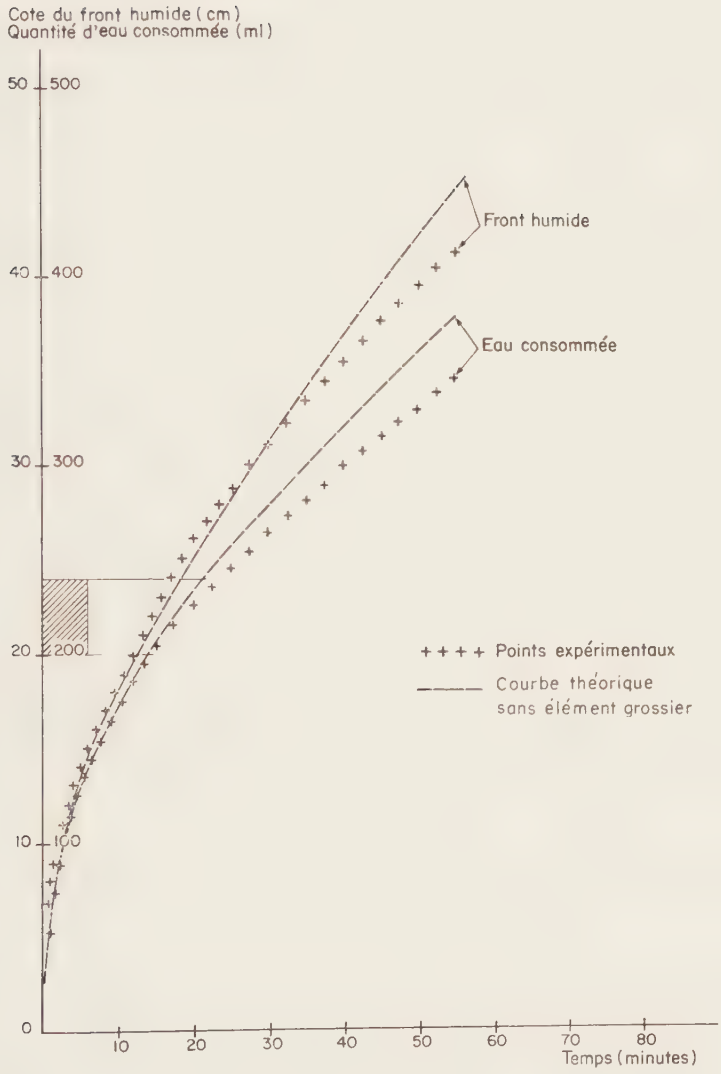


FIG. 28. — *Influence d'un prisme à base carrée* (hauteur : 4 cm, section : 6,8 cm,) *constitué de billes de verre, sur l'infiltration avec plan d'eau*

Diamètre de billes variant entre 1 mm et 1,25 mm

mousse et le massif de billes de verre. Tous ces matériaux qui ont une succion assez faible absorbent peu d'eau et se comportent donc de façon analogue à des éléments non poreux.

Dans tous les cas, une fois l'élément dépassé, la vitesse du front humide diminue.

3. 13. *Humectation verticale sans plan d'eau.*

On a utilisé les mêmes tubes pleins de sable que pour les éléments grossiers non poreux. Nous avons déjà vu que, pour les éléments non poreux, la formule reliant la variation de vitesse du front dans le sable au changement de section utile du sable était simple,

$$\text{pour} \quad 1 < S \cdot (S - u)^{-1} < 1{,}5.$$

Afin de mieux saisir, et, éventuellement, mieux analyser les effets des éléments grossiers poreux, nous nous sommes placé dans ces conditions : la section carrée des éléments étudiés avait 25 mm de côté pour la craie, le calcaire à milioles, le verre mousse et 27 mm pour le massif de billes de verre ; on a utilisé aussi un prisme de brique (20 × 20 × 50).

Ces prismes étaient disposés de façon que leurs axes de symétrie longitudinaux coïncident avec celui du tube. Le débit d'eau apporté était de l'ordre de 48 ml par heure (soit une lame d'eau de 20 mm par heure environ). La cote du front humide est notée en fonction du temps sur 4 génératrices du cylindre.

Les courbes représentant la cote du front humide dans le sol (moyenne de quatre mesures) en fonction du temps peuvent être classées en deux groupes du point de vue du sens de la variation de vitesse au niveau de l'élément (fig. 29) : pour le calcaire à milioles, le verre mousse et le massif de billes de verre, cette vitesse augmente, tandis que pour la craie et la brique elle diminue. La description de ces diverses courbes est donnée ci-dessous.

Calcaire à milioles. — La vitesse V_1 au niveau de l'élément rigide est *constante* et supérieure à la vitesse V_0 existant avant le passage de l'élément ($V_1 \cdot V_0^{-1} = 1{,}240$). L'augmentation de la vitesse V_1 est toutefois légèrement moindre que celle qui est provoquée par un élément non poreux de mêmes dimensions :

$$V_1 \cdot V_0^{-1} = 1{,}248$$

Verre mousse. — Il y a également augmentation de vitesse au niveau de l'élément

$$(V_1 \cdot V_0^{-1} = 1{,}208)$$

Massif de billes de verres. — L'augmentation de vitesse au niveau de l'élément est telle que $V_1 \cdot V_0^{-1} = 1{,}470$, rapport élevé à cause de la section plus grande de l'élément.

Craie. — Lorsque le front humide passe au niveau de l'élément, la diminution de vitesse, très nette, présente une forme particulière : elle s'accentue avec le temps, puis cesse brusquement avant que le front humide ait atteint la base du parallélépipède. La valeur V_1 étant calculée après ajustement linéaire de la courbe cote du front-temps, on a V^1 moyen. $V_0^{-1} = 0{,}705$. La brique se comporte de façon analogue à la craie, mais le phénomène est moins accentué.

Dans tous les cas, V_1 reprend progressivement la valeur initiale V_0 lorsque le front humide a dépassé la base de l'élément rigide.

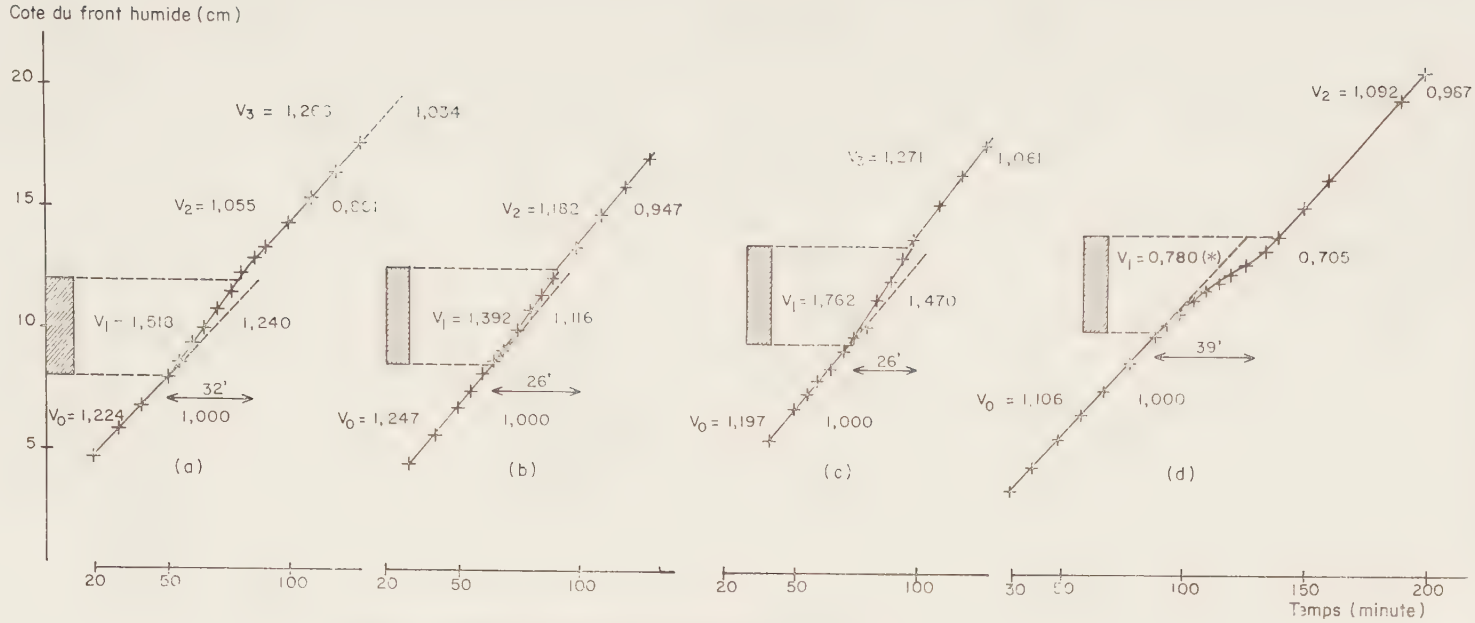


FIG. 29. *Influence des éléments grossiers perçus sur l'humectation verticale sans plan d'eau*

a : calcaire à milioles = hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²
b : verre mousse = hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²
c : billes de verre = hauteur : 4 cm, section : 7,3 cm²
d : craie hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²

A droite de la courbe, indices V_i/V_0 obtenus en faisant $V_0 = 1{,}000$

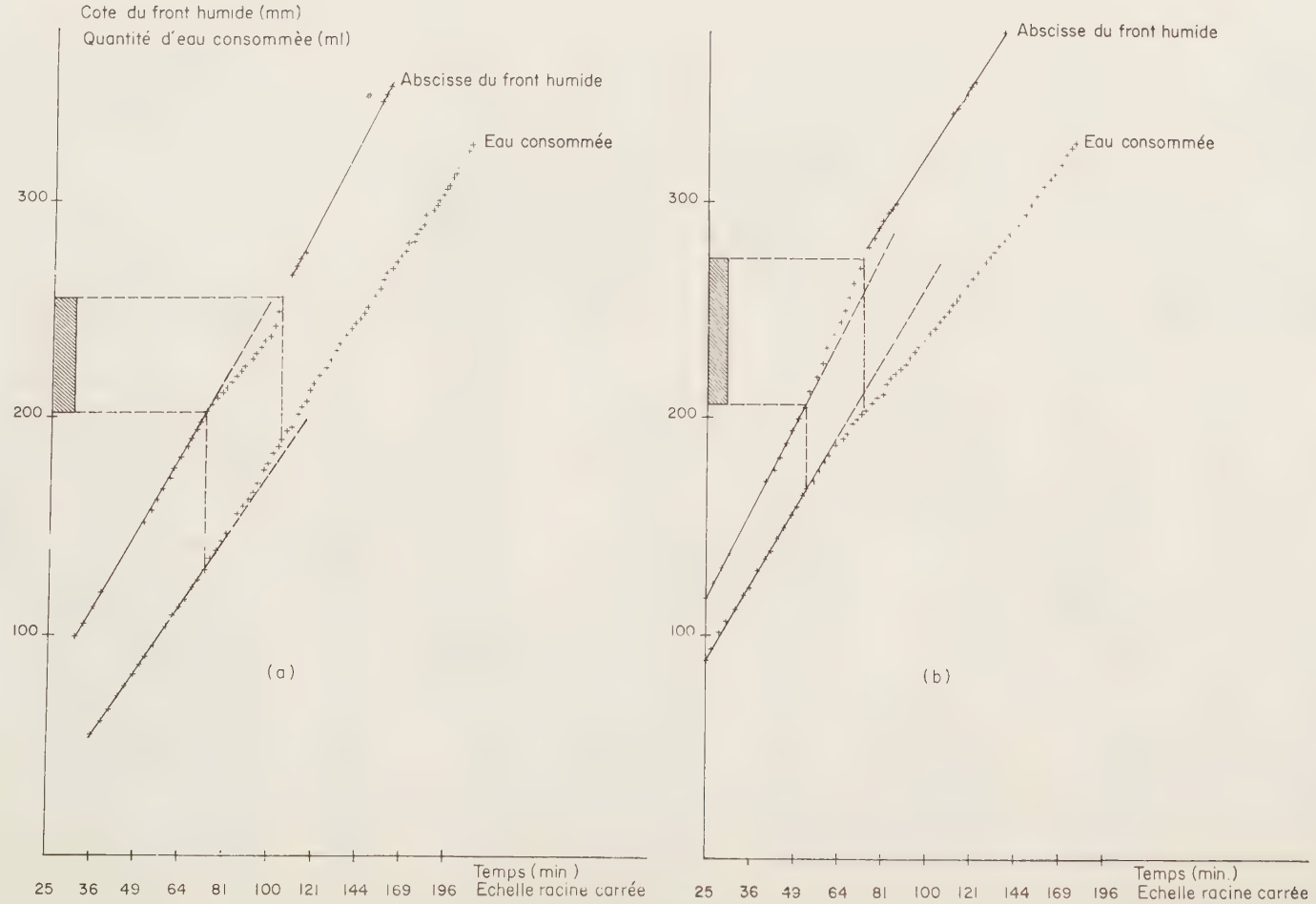


FIG. 30. — *Influence d'éléments grossiers poreux sur l'humectation horizontale*

a : craie = hauteur 5,3 cm, section 12,6 cm²
b : calcaire à milioles = hauteur 6,8 cm, section 12,6 cm²

3. 14. *Humectation horizontale.*

C'est le dispositif déjà utilisé pour les éléments non poreux qui a été mis en œuvre. On a placé dans le sable un cylindre de craie ou de calcaire à milioles.

La linéarité de la relation $x = f(\sqrt{t})$, où x est l'abscisse du front humide et t le temps, permet de constater facilement les modifications de vitesse apportées au déplacement du front humide (fig. 30).

Pour la craie, la forme de la courbe présente des analogies avec celle obtenue lors des infiltrations et humectations verticales. Au niveau de l'élément, diminution très sensible de vitesse, puis augmentation. Une fois l'élément dépassé, la vitesse diminue. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue légèrement à partir du moment où le front humide du sable aborde l'élément.

Dans le cas du calcaire à milioles, il y a une augmentation de la vitesse du front dans le sable au niveau de l'élément et ensuite un léger ralentissement lorsque le front humide a dépassé l'élément. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue dès que le front humide est arrivé à l'élément.

3. 2. — *Observation des déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et l'élément rigide*

Le dispositif comprend un tube ayant une paroi plane transparente contre laquelle on place une face de l'élément rigide (fig. 31) : on peut ainsi suivre en même temps le déplacement du front humide dans le sable et dans l'élément rigide.

Au cours du montage du dispositif, il faut éviter que du sable ne se place entre l'élément rigide et la paroi transparente ; par ailleurs, l'eau ne doit pas s'introduire dans les interstices de dimensions capillaires existant entre la paroi plane transparente et la face observée de l'élément ; cela perturberait l'observation du front humide.

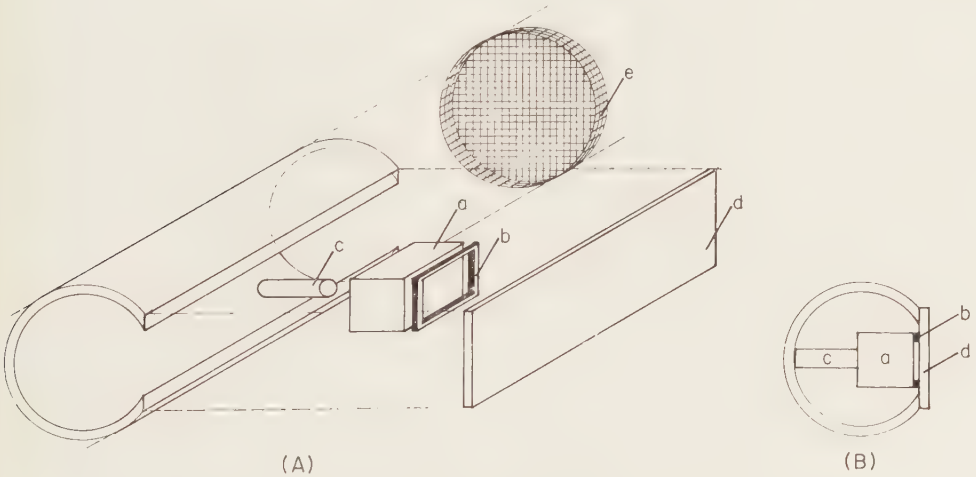


Fig. 31. — *Dispositif expérimental pour l'observation des déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément*

A : vue en perspective du dispositif démonté
B : coupe normale à l'axe :
a : élément grossier *b* : joint de caoutchouc
c : bouchon de caoutchouc jouant le rôle d'un ressort
d : paroi plane transparente
e : grillage
Les colliers de serrage maintenant l'ensemble ne sont pas représentés.

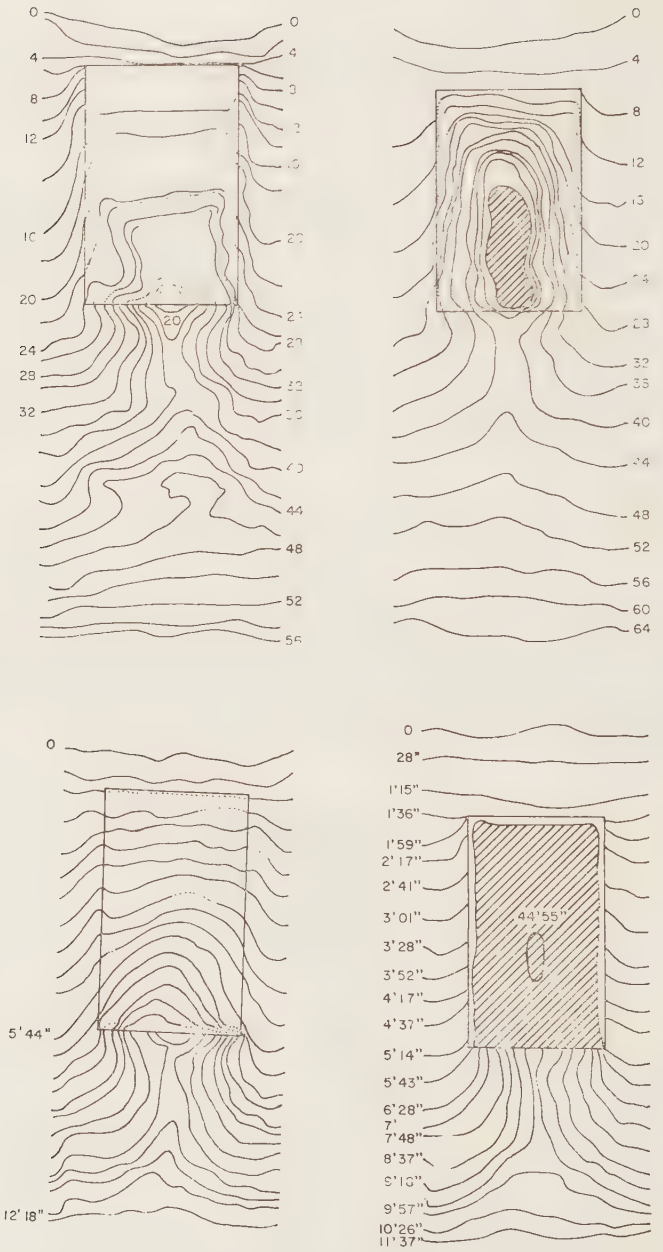


FIG. 32. — *Déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément*

à gauche : craie
à droite : calcaire à milioles
en haut : humectation verticale
en bas : infiltration

Les parties hachurées n'étaient pas humectées à la fin de l'expérience. Les durées sont exprimées en minutes et secondes.

Les inconvénients précédents ont été évités en utilisant un joint de caoutchouc rectangulaire, comme le montre la figure 31, qui représente le dispositif démonté : un bouchon de caoutchouc jouant le rôle d'un ressort, maintient l'élément rigide contre la paroi, le contact élément-paroi se faisant par l'intermédiaire du joint de caoutchouc.

L'étanchéité entre le tube et la plaque était assurée par du mastic.

Des observations ont été effectuées sur la craie et le calcaire à milioles pour l'infiltration avec plan d'eau, l'humectation verticale sans plan d'eau et l'humectation horizontale.

Il était tentant de suivre la progression du front humide par enregistrement photographique. La différence de teinte entre la craie sèche et la craie humide étant très faible, on a coloré l'eau ; mais comme on a observé une zone humide incolore en avant de la zone colorée (ce qui indiquait une séparation de la solution colorée en deux phases), nous n'avons pu retenir ce procédé. On s'est donc limité à l'observation visuelle en dessinant avec un marqueur à feutre les formes successives du front humide.

Dans la figure 32, les résultats sont placés dans une grille à double entrée comprenant horizontalement les matériaux et verticalement les deux catégories d'expériences (infiltration avec plan d'eau, humectation verticale sans plan d'eau). Les schémas auraient été plus comparables si les observations avaient été faites aux mêmes époques dans les deux types de percolation : en fait, cela n'était pas possible, les vitesses de déplacement du front humide étant très différentes pour l'infiltration et l'humectation. La figure 33 représente l'allure des fronts humides dans le cas de l'humectation horizontale.

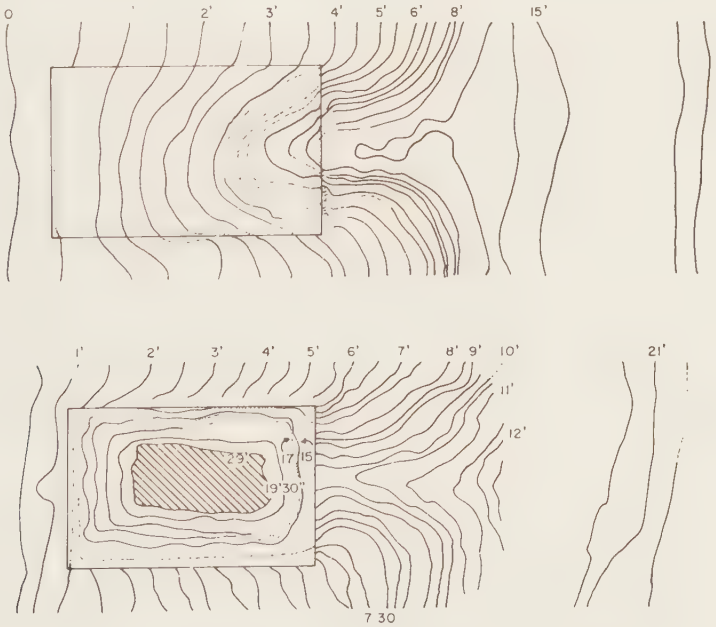


Fig. 33. — *Déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément grossier. Humectation horizontale*

En haut : craie ; en bas : calcaire à milioles

Sur la figure 32, on constate ceci :

— L'humectation est plus rapide dans la craie que dans le calcaire à milioles, certaines parties de ce matériau étant encore sèches à la fin de l'expérience.

— Pour la craie, il existe une différence dans la forme du front humide selon

les expériences : avec l'humectation sans plan d'eau, la trace du front humide est à peu près une droite, ce qui indique que l'alimentation en eau de la craie se fait surtout par la face supérieure horizontale, le front humide avançant assez lentement dans le sable. Dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau, la trace du front humide dans la craie prend progressivement une allure courbe ; en effet, le front humide avançant beaucoup plus vite dans le sable que dans la craie, les parties latérales de la craie reçoivent de l'eau à la fois par le haut (front humide de la craie) et par le côté (front humide du sable).

— Avec le calcaire à milioles, cette courbure progressive apparaît également dans le cas de l'humectation sans plan d'eau, la vitesse de déplacement du front humide dans l'élément étant de beaucoup inférieure à celle du sable ; la trace du front humide a même la forme d'une courbe fermée puisque l'humectation du calcaire à milioles se fait à partir d'un certain moment par le bas. Dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau, l'humectation du calcaire à milioles est quasi nulle ; ceci s'explique par le fait que cette expérience étant plus brève que la précédente, le front humide avance beaucoup plus vite dans le sable.

Dans le cas de la circulation horizontale (fig. 33), la courbure du front humide est très accentuée pour la craie ; pour le calcaire à milioles, la forte courbure du front, jointe à la lenteur de l'humectation, donne au front humide l'allure d'une courbe fermée.

Sur toutes les figures, on constate que la vitesse du front humide diminue une fois que ce dernier a dépassé l'élément, comme on l'a déjà signalé. Ceci indique que l'élément rigide n'est pas en mesure de transmettre de l'eau au sable.

L'ensemble de ces observations met l'accent sur l'importance du rapport des vitesses du front humide dans l'élément et dans le sable.

3. 3. — *Interprétation des résultats expérimentaux*

L'interprétation des résultats est différente selon qu'il s'agit de la transmission de l'eau dans le système saturé sable-élément grossier ou des variations positives d'humidité provoquées dans ce même système par l'infiltration et les humectations verticale et horizontale. Dans ces derniers cas, l'humidité varie avec le temps et les coordonnées du point considéré dans le système.

3. 31. *Interprétation dans le cas de la filtration*

Nous utiliserons la composition des résistances hydrauliques du filtre complexe constitué par l'élément grossier saturé et le sable.

Dans la partie centrale du filtre de longueur l_2, on a deux résistances en parallèle, celle du sable (perméabilité K_1) et celle du matériau rigide (perméabilité K_2) (fig. 34) ; la résistance équivalente J_2 se calcule ainsi, S étant la section du tube et u celle de l'élément grossier :

$$\frac{1}{J_2} = \frac{1}{l_2 K_1 (S - u)} + \frac{1}{l_2 K_2 u}, \text{ d'où } J_2 = \frac{l_2}{K_1 (S - u) + K_2 u}$$

La conductivité hydraulique globale est : $J_g = J_1 + J_2 + J_3$.

$$J_g = \frac{l_1}{K_1 S} + \frac{l_2}{K_1 (S - u) + K_2 u} + \frac{l_3}{K_1 S}$$

L'effet de l'élément poreux sur la résistance globale se déduit de la comparaison des expressions de J_u écrites avec et sans élément grossier poreux, ce qui modifie seulement le deuxième terme de cette expression. Ce deuxième terme s'écrit

$$l_2/[K_1 (S - u) + K_2 u] \text{ avec élément grossier}$$

et $l_2/K_1 S$ sans élément.

Il suffit de comparer les dénominateurs :

$$K_1 S - u (K_2 - K_1) \quad \text{et} \quad K_1 S.$$
$$K_1 S - u (K_2 - K_1) < K_1 S, \quad \text{si} \quad K_2 > K_1$$
$$K_1 S - u (K_2 - K_1) > K_1 S, \quad \text{si} \quad K_2 < K_1$$

La présence d'un élément rigide diminuera donc la perméabilité globale si sa perméabilité propre est inférieure à celle du milieu meuble. Ce sera le contraire si l'ordre des perméabilités est inverse.

FIG. 34. — *Calcul de la résistance hydraulique d'un filtre complexe constitué d'un élément grossier poreux placé dans du sable*

Les perméabilités des éléments rigides (craie = 0,000 2 cm/mn, calcaire à milioles = 0,000 3 cm/mn) étant inférieures à celles du sable (0,075 cm/mn), on peut s'attendre à une diminution de perméabilité globale lorsqu'ils sont présents dans le filtre. C'est effectivement ce que l'on a constaté.

On peut également vérifier qu'on retrouve par le calcul le rapport entre le débit du tube témoin D_1 et celui du tube contenant l'élément grossier D_2. En ne tenant pas compte de l'épaisseur du sable grossier à la base du tube (l'erreur est inférieure à 10^{-3} pour les tubes longs utilisés ici, cf. section 2. 21), le rapport des débits calculés est $(D_1/D_2)_c$ tel que :

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)_c = \frac{1}{l_1 + l_2 + l_3} \quad \frac{(l_1 + l_3 + l_2 K_1 S)}{K_1 (S - u) + K_2 u}$$

Pour la craie, le rapport D_1/D_2 observé est 1,148 et calculé 1,135. La concordance est moins bonne pour le calcaire à milioles : rapport observé 1,289 et calculé 1,175. Dans les deux cas, les différences entre valeurs observées et calculées sont inférieures à l'erreur entraînée sur la valeur calculée par l'imprécision des mesures :

$$\frac{\Delta (D_1/D_2)_c}{(D_1/D_2)_c} = 11 \text{ p. } 100 \text{ (Annexe 7).}$$

L'examen des valeurs numériques des différents termes du rapport D_1/D_2 montre que le terme $K_2 u$ n'intervient pratiquement pas sur le résultat. Les valeurs de K_2 sont tellement inférieures à la valeur de K_1 que tout se passe comme si les éléments rigides (craie et calcaire à milioles) étaient imperméables.

Pour le prisme de billes de verre, le rapport $(D_1/D_2)_c$ est de 0,61, alors que $(D_1/D_2)_0$ est de 0,93 pour 1 heure, 0,87 pour 2 heures et 0,79 pour 3 heures (ces rapports ne sont pas constants, la relation quantité d'eau écoulée-temps n'étant pas rigoureusement linéaire). La précision sur $(D_1/D_2)_c$, de l'ordre de 15 p. 100 (l'erreur relative croît lorsque la longueur du tube diminue) est toujours inférieure à la différence entre $(D_1/D_2)_c$ et $(D_1 D_2)_0$. On ne peut donc dans ce cas conclure à la validité de l'explication par la composition des résistances hydrauliques. Comme la valeur de D_2 observée est plus petite que la valeur calculée, il est vraisemblable que du sable fin a colmaté les pores de l'élément rigide, ce qui a diminué sa perméabilité.

3. 32. *Interprétation dans le cas des variations positives d'humidité.*

3. 321. *Considérations générales.*

Pour les humectations, le problème met en jeu un grand nombre de paramètres, que nous énumérerons d'abord, puis classerons dans la mesure du possible. A cette fin, nous distinguerons dans l'humectation du système sable-élément grossier deux phases : l'une, caractérisée par l'humectation de l'élément poreux rigide, dure tant que ce dernier absorbe de l'eau ; l'autre, qui commence au moment où cette absorption d'eau est terminée, peut être une transmission d'eau par l'élément rigide ou une absence d'effet.

a) *Phase d'humectation.*

La quantité d'eau élémentaire, dQ_E, fournie au système sable-élément pendant l'intervalle de temps dt, se répartit entre le sable (dQ_1) et l'élément (dQ_2) :

$$dQ_E = dQ_1 + dQ_2$$

La quantité d'eau dQ_1 peut augmenter l'humidité du sable qui, situé en arrière du front humide, est humecté sans être encore saturé (eau fournie dQ') et/ou faire avancer le front humide de dz en humectant le volume de sable $(S - u)\, dz$:

$$dQ_1 = dQ' + A\,(S - u)\, dz$$

La quantité d'eau dQ_2 peut se répartir de la même façon que ci-dessus dans l'élément grossier ; le front humide n'étant en général plus un plan, nous n'expliciterons pas dQ_2.

En divisant l'expression par dt, on obtient :

$$(dQ/dt)_E = dQ'/dt + A\,(S - u)\, dz/dt + dQ_2/dt\ ;$$

cette équation est valable à chaque instant seulement, parce qu'elle suppose que, dans l'intervalle de temps dt, la valeur de A ne change pas de façon appréciable. Elle ne présume en rien de la forme des fonctions $Q_E(t)$, $Q'(t)$ et $Q_2(t)$.

On peut considérer divers cas suivant la régulation du débit par le système, l'absorption d'eau par l'élément rigide et les variations d'humidité du sable en deçà du front humide :

— Le débit d'eau absorbé par le système est indépendant de celui-ci dans l'humectation verticale sans plan d'eau puisque l'expérimentateur impose $(dQ/dt)_E = C$. Mais le débit peut dépendre, en plus des conditions imposées par l'expérimentateur, du système lui-même : Dans l'infiltration, on impose l'épaisseur de la lame d'eau en surface ; le débit absorbé dépend de l'épaisseur de cette lame d'eau, mais aussi du

système : le débit est autoréglé. Une situation analogue se retrouve dans l'humectation horizontale. Les modifications de la circulation d'eau dans le filtre se répercutent sur le débit absorbé lorsqu'il est autoreglé. Par contre, lorsque le débit est indépendant, les modifications de circulation de l'eau ne modifient pas le débit absorbé.

— L'absorption d'eau par l'élément rigide peut être nulle : $dQ_2/dt = 0$, ou appréciable : $dQ_2/dt > 0$.

— La quantité d'eau qui modifie l'humidité du sable déjà humecté peut également être nulle : $dQ'/dt = 0$, ou appréciable : $dQ'/dt > 0$.

Parmi les différentes combinaisons possibles des cas précédents, nous retiendrons celles qui correspondent aux principales expériences :

$dz/dt = \frac{I}{A\,(S-u)}\,C$, débit indépendant, pas de changement d'humidité du sable humecté, pas d'absorption d'eau par l'élément grossier, poreux ou non d'où :

$$z = [C/A\,(S-u)]\,t + C^{te}.$$

$dz/dt = \frac{I}{A\,(S-u)}\,[C - dQ_2/dt]$, débit indépendant, pas de changement d'humidité du sable humecté.

$dz/dt = \frac{I}{A\,(S-u)}\,(dQ/dt)_E$: débit autoréglé, pas de changement d'humidité du sable humecté, pas d'absorption d'eau par l'élément grossier.

$dz/dt = \frac{I}{A\,(S-u)}\,[(dQ/dt)_E - dQ_2/dt]$, débit autoréglé, pas de changement d'humidité du sable humecté, absorption d'eau par l'élément grossier.

L'eau peut passer du sable à l'élément grossier sous l'influence de son poids, de la pression et de la succion : la gravité intervient dans toutes les situations, la pression nécessite pour se transmettre un minimum de remplissage de la porosité ; enfin, l'eau passe d'un point A à un point B, si la succion est plus élevée en B qu'en A. Notons que la succion dépend de la dimension des pores, mais aussi de leur remplissage plus ou moins complet par l'eau. Tant dans le sable que dans l'élément grossier, l'humidité n'est certainement pas constante en arrière des fronts humides ; il y a en général un gradient d'humidité provoqué par le fait que, dans un corps poreux, les pores n'ont pas tous le même rayon équivalent et que, de ce fait, l'eau avance plus vite dans les capillaires les plus larges. Le schéma 35 montre comment peut se faire le transfert d'eau entre le sable et l'élément grossier. On y voit que la transmission de l'eau à l'élément rigide dépend de la surface de contact entre l'élément et le sable mouillé, qui se décompose en une surface de section constante et une surface latérale croissant avec le temps.

Ceci amène à considérer les vitesses relatives du front humide dans le sable et dans l'élément. A part le cas des vitesses égales (qui suppose que les caractéristiques de porosité sont les mêmes dans le sable et dans l'élément grossier), on distingue *a priori* deux cas :

— Vitesse de front humide plus grande dans le sable que dans l'élément rigide : la trace du front humide dans l'élément rigide prend une forme courbe, puisque de

l'eau est fournie à l'élément par la face horizontale et par la surface latérale.

Dans l'élément, la trace du front humide prend la forme d'une courbe fermée lorsque son déplacement est très lent ; l'élément est alors entouré de tous côtés par le sable humide et il existe en son centre un volume d'air isolé de l'extérieur par le sable humide.

— Vitesse du front humide plus petite dans le sable que dans l'élément grossier. Ce cas qui entraîne que le sable s'humecte à partir des faces latérales de l'élément grossier est très improbable, comme nous le montrerons ultérieurement.

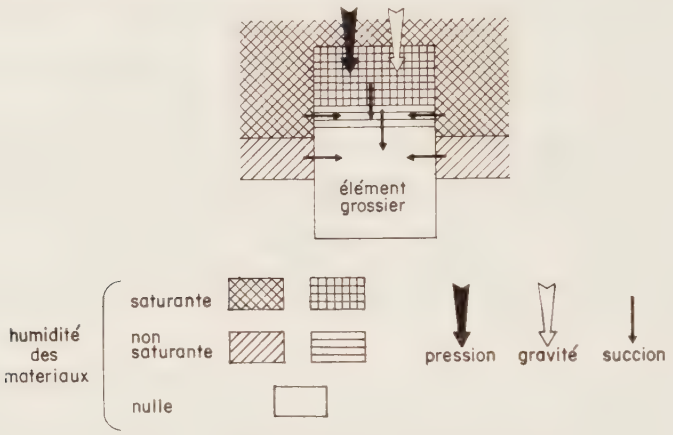


FIG. 35. — *Transfert d'eau du sable à l'élément grossier*
(schéma théorique)

Examinons les conditions de passage de l'eau du sable à l'élément grossier, en supposant que chaque milieu poreux est constitué d'un faisceau de capillaires de même diamètre, dont la mouillabilité est parfaite ; leur rayon est r_1 pour le sable et r_2 pour l'élément grossier.

$r_1 > r_2$, la succion est plus forte dans l'élément grossier qui est toujours en mesure d'extraire de l'eau du sable. On conçoit alors que, par un phénomène analogue à ce qui se passe dans deux sables contigus de dimensions de grain différentes, l'eau passe, du fait des différences de succion, du milieu le plus grossier au milieu le plus fin, comme l'a montré COURAU (1969).

En définitive même si le sable n'est pas saturé, l'eau passera dans l'élément dès que le front humide du sable arrivera à son contact.

$r_1 < r_2$. Pour analyser ce cas, considérons dans le sable un capillaire de rayon r_1 exerçant une succion ψ_1, en communication avec un capillaire de rayon r_2 exerçant une succion ψ_2 placé dans l'élément grossier (fig. 36). Si le sable n'est pas saturé, il y a deux ménisques dans le tube vertical. Pour chacun d'eux, la pression sera $-\psi_1$ par rapport à la pression atmosphérique P*a*. La pression négative dans le tube sera partout égale à ψ_1 (fig. 36 *b*). Elle sera inférieure à la pression ψ_2 exercée par le capillaire de l'élément rigide ; l'eau ne passera donc pas dans ce dernier. Si l'on impose un plan d'eau d'épaisseur constante (fig. 36 *c*), par rapport à la pression atmosphérique la pression en A est « *a* » et la pression arrière du ménisque est $-\psi_1$. Lorsque le ménisque est au nivean du pore large, l'eau est soumise à une pression négative bien inférieure à la succion ψ_2 exercée par le pore large (en négligeant la perte de

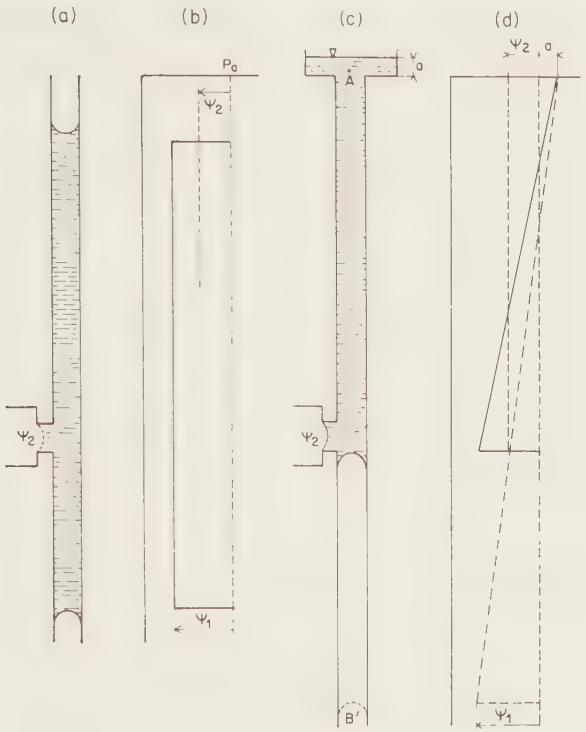


FIG. 36. — *Passage de l'eau d'un capillaire de rayon r_1* (sable) *à un capillaire de rayon supérieur r_2* (élément poreux rigide)

a : pas de plan d'eau
b : pression dans le capillaire pour le schéma (*a*)
c : avec plan d'eau
d : pression dans le capillaire pour le schéma (*c*)

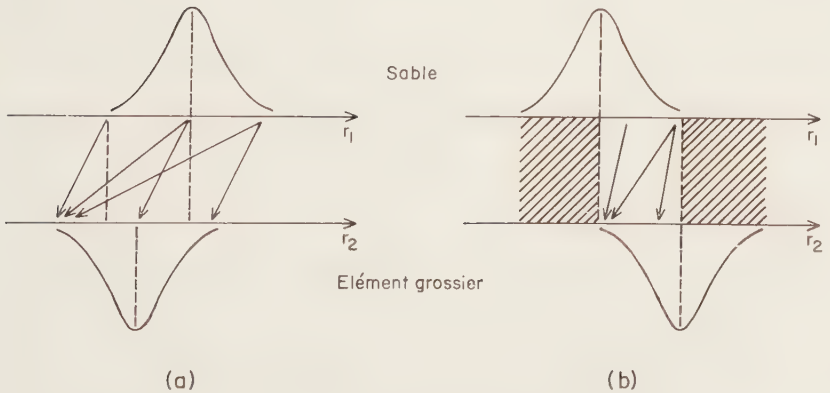


FIG. 37. — *Passage de l'eau des pores du sable à ceux de l'élément grossier*

a : possible de tous les pores du sable vers tous les pores de l'élément grossier
b : possible seulement d'un groupe de pores du sable vers un groupe de pores de l'élément grossier

charge dans le tube de raccordement très court) : L'eau ne peut passer dans le tube large. Elle ne pourra y passer que lorsque le ménisque dans le sable sera descendu à une cote telle que la pression négative dans l'eau sera inférieure à ψ_2 (point B′ de la figure 36 *c*). Les pores de l'élément grossier ne commenceront donc à se remplir que lorsque le front humide du sable sera au-dessous de la partie supérieure de l'élément. Le front humide dans l'élément grossier sera donc toujours en retard par rapport à celui du sable, ce qui conduit à rejeter toute possibilité d'humectation du sable par l'élément grossier au cours de cette phase.

En fait, on n'a pas un rayon de pores, mais une population de rayons dispersés autour d'une valeur moyenne : nous supposerons que les populations de rayons de pores du sable et de l'élément grossier ne sont différentes que par leurs valeurs moyennes r_m (écart type constant).

$r_{m1} > r_{m2}$ (fig. 37 *a*), l'eau peut toujours passer par succion du sable à l'élément grossier, pourvu que les pores des deux milieux soient en communication et aient des diamètres convenables.

$r_{m1} < r_{m2}$: une partie des pores sera inefficace pour le passage de l'eau du sable à l'élément grossier ; ce seront ceux de l'élément plus larges que ceux du sable et ceux du sable plus étroits que ceux de l'élément (fig. 37 *b*) ; lorsque les gammes de variation des pores n'ont pas de recouvrement, aucun passage d'eau du sable à l'élément n'est possible sous l'influence de la succion.

b) *Phase postérieure à l'humectation.*

Une fois l'absorption d'eau par l'élément rigide terminée, ce dernier peut transmettre de l'eau s'il a une perméabilité suffisante, ou être quasi inerte à cause soit de sa faible perméabilité s'il est plein d'eau, soit de son absence de remplissage.

L'allure du front humide du sable dépend aussi du moment où l'humectation de l'élément est terminée.

3. 322. *Interprétation dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau.*

L'élément grossier poreux provoque des modifications de la loi de déplacement déjà compliquée du front humide du sable $z + f(z) = At$; par ailleurs, la loi de déplacement du front humide dans l'élément grossier est également compliquée, puisque ce front humide est une surface gauche, et que même dans le cas de l'infiltration par la seule surface de section, la loi n'est pas linéaire (Annexe 8).

Rappelons aussi que le pourcentage de saturation *moyen* du sable (rapport du volume d'eau dans le tube à la porosité totale) est seulement de 75 p. 100 ; comme le sable est vraisemblablement saturé dans la partie supérieure du tube proche de la lame d'eau de la surface, le pourcentage de saturation au voisinage du front humide est inférieur à la valeur donnée ci-dessus.

Pour toutes ces raisons, on proposera seulement une explication qualitative de l'effet des éléments poreux sur la cinétique du front humide dans le sable, en comparant à chaque instant :

— la vitesse dz/dt qu'aurait le front humide dans le sable, s'il n'y avait pas d'élément. Cette vitesse décroît avec z puisqu'elle est proportionnelle à : $1 + (a + \psi)/z$ (voir section 1. 42), elle s'écrit : $dz/dt = \frac{1}{AS}(dQ/dt)$;

— la vitesse $(dz/dt)_E$ du front humide dans le sable en présence d'éléments

$$(dz/dt)_E = \frac{1}{A\,(S - u)}\,[(dQ/dt)_E - (dQ_2/dt)]$$

On a fait, entre autres, l'approximation que $dQ' = 0$.

En établissant le rapport de ces vitesses, on obtient :

$$\frac{(dz/dt)_E}{dz/dt} = \frac{S}{S - u}\left[\frac{(dQ/dt)_E}{dQ/dt} - \frac{dQ_2/dt}{dQ/dt}\right]$$

Comme l'adjonction de l'élément au système modifie le débit d'eau absorbé qui passe de $dQ\ dt$ à $(dQ\ dt)_E$, on peut poser : $\frac{(dQ/dt)_E}{dQ/dt} = 1 + k(t)$, k étant une fonction du temps, > 0 si l'adjonction de l'élément augmente le débit, < 0 dans l'autre éventualité. On peut alors écrire l'expression sous cette forme :

$$\frac{(dz/dt)_E}{dz/dt} = \frac{1 + k(t) - (dQ_2/dt)/(dQ/dt)}{1 - u/S}$$

Cette équation représente les changements de vitesse du front humide dans le sable sous l'influence de deux effets antagonistes : augmentation de vitesse du front humide dans le sable par suite de la diminution de section de tube pleine de sable (le rapport croît si u croît), ralentissement de ce front à la suite de l'absorption d'eau par l'élément poreux (le rapport décroît si dQ_2/dt décroît).

Le rapport des vitesses est donné par la valeur du deuxième membre de l'équation :

$$(dz/dt)_E > (dz/dt) \quad \text{si} \quad (dQ_2/dt)\ /\ (dQ/dt) - k(t) < u\ /\ S \qquad (1)$$

$$(dz/dt)_E < dz/dt \quad \text{si} \quad (dQ_2/dt)\ /\ (dQ/dt) - k(t) > u\ /\ S \qquad (2)$$

Ces inégalités comparent une différence de rapports sans dimensions concernant les débits :

$$\frac{\text{débit absorbé par le système sans élément}}{\text{débit absorbé par l'élément}} - \left\{\begin{array}{l}\text{indice de variation de débit absorbé}\\ \text{par le système provoquée par l'élé-}\\ \text{ment grossier}\end{array}\right.$$

à un rapport sans dimension concernant les sections :

$$\frac{\text{surface de section de l'élément}}{\text{surface de section du système}}$$

Pour *la craie*, on a constaté une diminution de $(dQ/dt)_E$ par rapport à dQ/dt, donc $k < o$.

La comparaison des courbes $(dz/dt)_E - z$ et $(dz/dt) - z$ (cette dernière étant obtenue par extrapolation au-delà de la cote du sommet de l'élément) fait apparaître trois zones (fig. 38) :

— $(dz/dt_E < (dz/dt)$ pour un intervalle d'espace dont les bornes sont le haut de l'élément et le point situé 3 à 4 cm au-dessous. On a les inégalités (2) ci-dessus.

Les variations de vitesse instantanée sont assez compliquées dans cet intervalle, peut-être à cause d'hétérogénéités locales, mais l'inégalité des vitesses y est cependant toujours vérifiée. Dans ce cas la valeur des expressions concernant les débits l'em-

porte sur celle concernant les sections, ce qui correspond à une forte absorption instantanée par la craie.

La vitesse du front humide du sable passe ensuite par un minimum. Signalons que la quantité totale d'eau absorbée par la craie au cours de l'expérience représente 40 p. 100 de son volume apparent.

— $(dz/dt)_E > (dz/dt)$ depuis la borne supérieure de l'intervalle précédent jusqu'au bas de l'élément. Les inégalités (1) sont vérifiées, l'absorption d'eau étant moins importante que précédemment.

— Une fois l'élément dépassé, la vitesse (dz/dt) diminue fortement avant de croître à nouveau. Cette diminution temporaire de vitesse s'explique par le fait que la craie ne transmet pas d'eau au sable en quantité appréciable (elle est 10^{-2} environ moins perméable que lui) : pour humecter le sable sec qui se trouve sous la craie, l'existence d'une composante horizontale du déplacement de l'eau est nécessaire (cf. fig. 13).

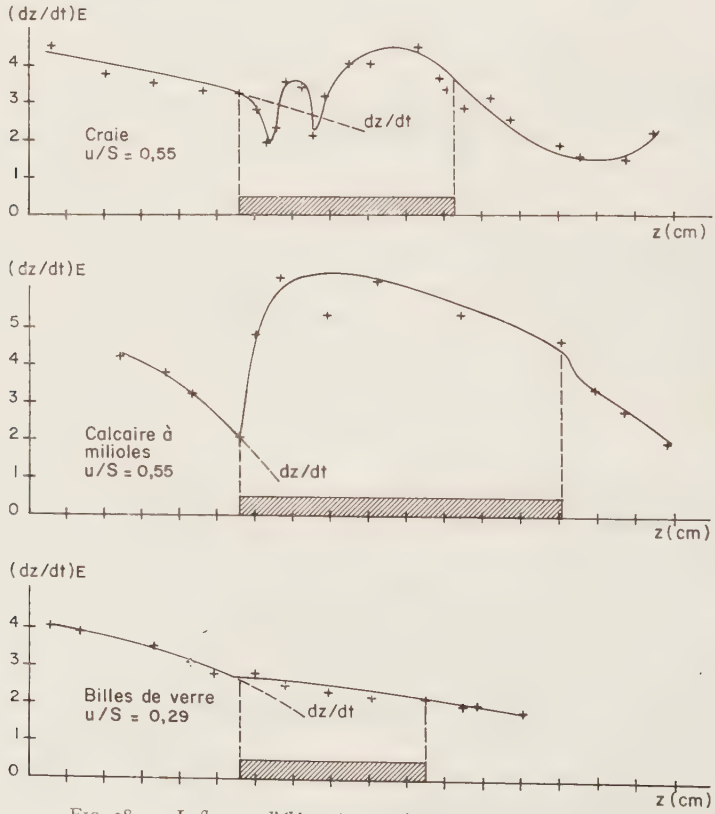


FIG. 38. — *Influence d'éléments grossiers poreux sur l'infiltration vitesse instantanée en fonction de la cote*

Pour le *calcaire à milioles*, on a encore $k(t) < 0$, mais constamment $(dz/dt)_E > (dz/dt)$ (fig. 38).

Les inégalités (1) sont satisfaites. Ceci s'explique par la faible valeur de dQ_2/dt, la quantité d'eau absorbée par l'élément étant seulement de 11 p. 100 de son volume

apparent. La vitesse $(dz/dt)_E$ passe par un maximum avant de diminuer, elle présente une diminution plus marquée une fois que le front humide a dépassé l'élément, pour les mêmes raisons que la craie.

Comme *le prisme de billes* de verre a une section moindre que les éléments ci-dessus, l'augmentation de vitesse est moins marquée que pour le calcaire à milioles (fig. 38). En effet, quoique sa perméabilité soit plus élevée que celle du sable, il s'est comporté en fait comme un corps non poreux. Placé au sein du sable, il n'a pas absorbé d'eau comme on l'a constaté à la fin de l'expérience, certainement à cause de sa faible succion et du fait qu'au moment où l'eau pouvait pénétrer dans ses pores (fig. 36) il était entouré de sable humide de toutes parts, ce qui pouvait empêcher l'expulsion de l'air.

3. 323. *Interprétation pour l'humectation verticale sans plan d'eau.*

L'expression générale fournissant le rapport des vitesses du front humide dans le sable (cf. section 3. 3. 2. 2) se simplifie en remarquant que dans ce cas :

— le débit absorbé étant indépendant du système : $k(t) = 0$ et $dQ/dt = C$, C étant une constante ;

— la vitesse du front humide en l'absence d'élément est constante et égale à V_0.

On obtient donc $(dz/dt)_E = V_0 \dfrac{1 - (dQ_2/dt)/C}{1 - u/S}$

Pour le prisme de billes de verre, le verre mousse et le calcaire à milioles, la vitesse $(dz/dt)_E$ est constante au passage de l'élément, ce qui entraîne $dQ_2/dt = C'$, C' étant une constante. En posant $(dz/dt)_E = V_1$, l'expression devient alors :

$$V_1 V_0 = \frac{1 - C'/C}{1 - u/S}$$

Cette formule constitue une approximation de la réalité pour la craie et la brique, puisque $(dz/dt)_E$ varie avec le temps.

Écrite sous la forme : $V_1 V_0^{-1} = \left(\dfrac{C - C'}{C}\right)\left(\dfrac{S - u}{S}\right)$, elle traduit les influences antagonistes de la variation relative de débit disponible pour humecter le sable $(C - C')/C$, et de la variation relative du volume de sable à humecter, traduite par les variations de section correspondantes.

Elle permet de retrouver le sens de la variation de vitesse :

$V_1/V_0 > 1$ si $1 - C'/C > 1 - u/S$, $C'/C < u/S$

la diminution de volume à humecter l'emporte sur la diminution de volume disponible pour humecter le sable. Cas de tous les éléments sauf la brique et la craie dans les conditions des expériences.

$V_1/V_0 < 1$ $C'/C > u/S$, conditions réalisées dans les expériences avec la brique et la craie, l'absorption d'eau par ces éléments étant importante.

On peut calculer avec cette formule la quantité d'eau absorbée par l'élément poreux $Q_2 = C't$ et comparer la valeur ainsi calculée à la valeur obtenue par pesée de l'échantillon (Gras, 1968). On tire C' de l'équation précédente dans laquelle V_0, V_1, u, S et C sont connus, la durée d'absorption t est évaluée par l'examen des courbes

cote du front humide temps (fig. 29) : on admet que l'élément absorbe de l'eau tant que la vitesse du front humide est abaissée de façon appréciable. Pour la brique et la craie on a fait une approximation en prenant pour V_1 la pente de la droite de régression calculée à l'aide des points expérimentaux.

Le tableau 2 permet de comparer les valeurs calculées et mesurées.

TABLEAU 2

Quantités d'eau absorbées par les éléments grossiers

Matériau		Billes de verre	Verre mousse	Calcaire à milioles	Brique	Craie
Quantité d'eau absorbée par l'élément (g)	mesurée	0	2,7	2,8	5,9	10,6
	calculée	0	0,1	2,7	5,0	12,8

La concordance entre les valeurs mesurées et calculées est excellente pour les billes de verre ($V_1 = V_0/(1 - u/S)$, puisque $Q_2 = 0$), et le calcaire à milioles. Pour le verre mousse, le désaccord est très important ; avec la brique et la craie, le désaccord provient vraisemblablement de l'approximation faite en considérant une vitesse moyenne constante.

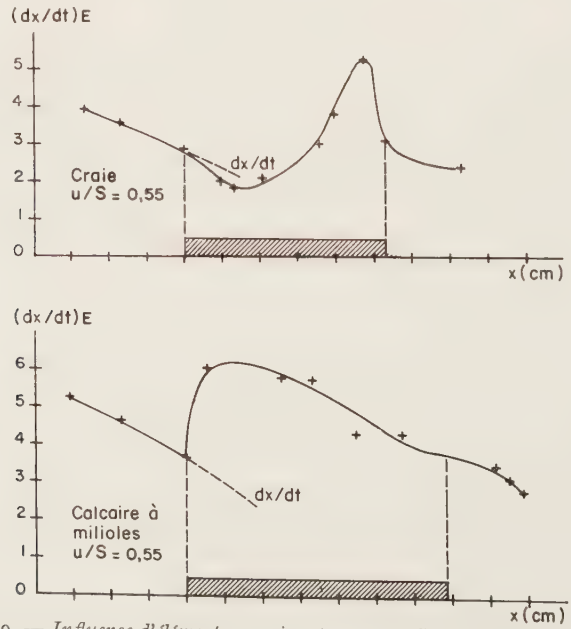


FIG. 39. — *Influence d'éléments grossiers poreux sur l'humectation horizontale vitesse instantanée en fonction de l'abscisse*

Le comportement des billes de verre montre qu'un corps poreux peut avoir le même effet qu'un corps non poreux de volume et de forme identiques, l'absorption d'eau dépendant en définitive des rayons équivalents des pores du corps poreux et du sable ; dans le cas de l'infiltration sans plan d'eau, l'eau est retenue par le sable avec une succion de 30 cm d'eau environ (d'après la courbe humidité succion).

La craie est le seul élément pour lequel le calcul surestime la quantité d'eau absorbée, vraisemblablement parce que la loi $Q_2 = f(t)$ est plus compliquée que la loi linéaire utilisée ici.

3. 324. *Humectation horizontale.*

La comparaison des courbes $(dz\text{-}dt)_E$ et (dz/dt) (fig. 39) met en évidence des effets analogues à ceux déjà notés dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau.

En présence de craie, la vitesse du front humide passe par un minimum, puis par un maximum avant de diminuer après le passage de l'élément.

Pour le calcaire à milioles, la vitesse $(dz/dt)_E$ est constamment supérieure à dz/dt, et sa variation présente la même allure que dans le cas de l'infiltration verticale avec plan d'eau.

IV. — CONCLUSIONS SUR LES EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DU SABLE

4. 1. — *Front humide dans le sable au niveau de l'élément*

On compare, pour une même valeur de la cote ou de l'abscisse du front humide dans le sable, la vitesse instantanée de ce front $(dz\ dt)_E$, à la vitesse qu'aurait ce même front en l'absence d'élément $(dz\ dt)$. Le sens des expressions utilisées est rappelé ci-dessous :

débit instantané absorbé par l'élément : dQ_2/dt,

débit instantané fourni au système sans élément : dQ/dt (pour certaines expériences : $dQ/dt = C$),

rapport des surfaces de section de l'élément et du tube : u/S.

Lorsque l'élément grossier n'absorbe pas d'eau, le front humide dans le sable avance plus vite que dans le témoin. Dans le cas où le débit absorbé est indépendant du système (humectation verticale) la vitesse constante $(dz/dt)_E$ peut se calculer dans certains cas à partir de considérations simples. Si le débit est autoréglé (infiltration, humectation horizontale), $(dz/dt)_E$ peut être calculé en utilisant les lois de l'hydrodynamique et la composition des résistances hydrauliques.

Si l'élément grossier absorbe de l'eau, le signe de l'expression e :

$$\frac{\text{débit absorbé par élément}}{\text{débit absorbé par le système sans élément}} + \text{indice de variation de débit absorbé provoqué par le système} - \frac{\text{surface de section de l'élément}}{\text{surface de section du système}}$$

situe la valeur du rapport $(dz'/dt)_E/(dz/dt)$ par rapport à 1, lorsque le débit est autoréglé :

$$(dz/dt)_E > (dz/dt) \quad \text{si} \quad e < 0$$
$$(dz/dt)_E < (dz/dt) \quad \text{si} \quad e > 0$$

Si le débit absorbé est indépendant du système, l'expression ci-dessus se simplifie, l'indice de variation de débit étant nul. C'est la balance entre la diminution du volume de sable à humecter (qui augmente la vitesse du front humide) et la consommation d'eau par l'élément (qui diminue cette même vitesse) qui détermine le sens de la variation de vitesse. Le tableau 3 rassemble les principaux résultats.

4. 2. — *Front humide dans le sable au-delà de l'élément*

Dès que le front humide a dépassé l'élément grossier, une partie de l'eau sert à humecter le sable placé immédiatement sous l'élément, ce qui perturbe la vitesse.

Une fois cette perturbation disparue, on a les cas suivants :

— Débit absorbé indépendant du système : dans le cas d'absorption nulle (corps non poreux ou corps poreux ne se remplissant pas), la vitesse du front humide du sable reprend la valeur V_0 qu'elle avait avant que l'élément ait été atteint par le front. Lorsque l'absorption est appréciable, la vitesse reprend plus ou moins rapidement la valeur V_0, selon que l'absorption d'eau par l'élément dure plus ou moins longtemps ; en général, de tels effets sont difficiles à mettre en évidence.

— Débit autoréglé : la présence de l'élément augmentant la résistance hydraulique (élément non poreux — poreux peu perméable ou ne se remplissant pas d'eau), la vitesse du front humide est toujours réduite par la présence de l'élément. Il faut insister sur le cas, aberrant à première vue, de corps à perméabilité élevée qui augmentent la résistance hydraulique parce qu'ils ne peuvent s'emplir d'eau.

Pour un corps poreux placé dans le sable, il y a théoriquement une phase d'humectation (lorsqu'il se remplit d'eau) et une phase de transmission de l'eau au sable. Chaque corps poreux n'intervient pas forcément avec la même intensité dans ces deux phases, l'action pouvant même être nulle pour l'une et/ou l'autre de ces phases Le tableau à double entrée représente les diverses éventualités théoriquement pos sibles, le signe + indiquant une intervention et le signe o son absence.

		Transmission	
		+	0
Humectation	+	1	2
	0	3	4

L'éventualité 1 correspond au cas d'un corps poreux, qui, après s'être humecté, transmettrait de l'eau au sable ; il n'a pas été possible de mettre en évidence un comportement de ce genre, qui implique des pores de dimensions telles que leur succion soit supérieure à celle du sable et que leur pouvoir de transmission de l'eau soit encore appréciable.

TABLEAU 3

Vitesse du front humide $(dz/dt)_E$ *dans le sable au niveau de l'élément grossier*

Alimentation en eau du système	Absorption par l'élément grossier : Nulle : $dQ_2/dt = 0$	Absorption par l'élément grossier : Appréciable : $dQ_2/dt > 0$
Débit indépendant du système (Pas de plan d'eau, alimentation goutte à goutte) $dz/dt = V_0$	pour $S \cdot (S - u)^{-1} < 1{,}5$: $V_1 = V_0 \cdot S \cdot (S - u)^{-1}$ pour $S \cdot (S - u)^{-1} > 1{,}5$: $V_1 = 1{,}37 \log [S \cdot (S - u)^{-1}] + 1{,}1$ D'après ces expressions dans tous les cas $V_1 > V_0$, ou $(dz/dt)_E > (dz/dt)$ Pour • éléments non poreux • éléments poreux n'absorbant pas d'eau : billes de verre	pour $S(S - u)^{-1} < 1{,}5$ $(dz/dt)_E = V_0 \dfrac{1 - (dQ_2/dt)\ (dQ/dt)}{1 - u/S}$ pour craie et brique $V_1 = V_0 \dfrac{1 - (dQ_2/dt)/C}{1 - u/S}$ pour calcaire à milioles, verre mousse. $(dz/dt)_E/(dz/dt)$ est $>$ ou $<$ 1 suivant que $(dQ_2/dt)/(dQ/dt)$ est inférieur ou supérieur à u/S,
Débit autoréglé par le système + infiltration verticale (lame d'eau d'épaisseur constante en surface)	$\dfrac{(dz/dt)_E}{(dz/dt)} = \dfrac{z/K_1 + l_1/K_1}{z/K_1 + \dfrac{l_1 (S - u)}{K_1 S}}$ d'après le calcul de 2. 22 D'après cette expression : $(dz/dt)_E > (dz/dt)$	Pas de formule générale $(dz/dt)_E/(dz/dt)$ est > 1 ou < 1 suivant que $(dQ_2/dt)/(dQ/dt) - k$ est inférieur ou supérieur à u/S, k : indice de variation de débit absorbé provoqué par l'élément grossier.
+ infiltration horizontale (tube coudé plongeant dans l'eau)	$\dfrac{(dx/dt)_E}{(dx/dt)} = \dfrac{x/K_1 + l_1/K_1}{x/K_1 + \dfrac{l_1 (S - u)}{K_1 S}}$ d'après le calcul de 2. 23. D'après cette expression : $(dx/dt)_E > dx/dt)$ Pour • éléments non poreux • éléments poreux n'absorbant pas d'eau : billes de verre	

Le cas 2 correspond à celui de la craie, qui s'humecte rapidement au détriment du sable, à cause de la succion élevée des pores fins, qui sont, par contre, très défavorables à la transmission de l'eau.

Le comportement de type 3 est impossible, puisqu'un matériau ne peut pas transmettre de l'eau, sans s'être humecté préalablement.

Le comportement de type 4 a été mis en évidence pour le prisme de billes de verre : pas d'humectation et donc pas de transmission. Signalons enfin que le système constitué par un matériau à gros pores placé dans du sable est instable, le volume poral se remplissant peu à peu de sable.

V. — HUMECTATION DES MATÉRIAUX POREUX RIGIDES PAR L'INTERMÉDIAIRE DU SOL

Nous nous attachons maintenant à l'étude de l'humectation des éléments grossiers par l'intermédiaire du sol. A cet effet, nous rassemblons les résultats d'humectation obtenus dans les expériences en tube précédentes. Ces résultats sont complétés par ceux d'expériences complémentaires sur la succion dans la terre et la durée de contact sable éléments grossiers.

5. 1. — *Expériences sur la succion appliquée à l'eau de la terre*

Ces expériences de durées différentes étudient l'humectation de matériaux poreux rigides par l'intermédiaire de trois terres, dont l'eau est soumise à des succions contrôlées différentes.

5. 11. *Dispositif expérimental.*

L'appareil de Haines, utilisé pour amener l'eau dans la terre à une tension donnée (fig. 40), comprend un Büchner à plaque de verre fritté n° 4 relié par un tuyau souple à un entonnoir. La tension d'humidité en un point donné du sol est la différence des cotes de ce point et du niveau d'eau dans l'entonnoir.

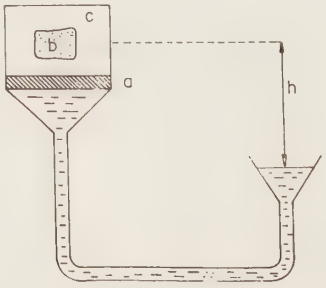


Fig. 40. — *Humectation dans un appareil de Haines*

a : plaque poreuse
b : élément poreux rigide
c : terre
h : valeur de la succion

Comme l'élément poreux a 25 mm d'épaisseur, la succion dans la terre est plus basse à la partie inférieure de l'échantillon ; dans la suite du texte,nous donnons comme valeur de la succion celle existant dans la terre à la base du büchner.

Pour remplir l'appareil de Haines, on maintient l'eau à une tension élevée de 150 cm d'eau, de façon à humecter le moins possible la terre, ce qui facilitera son tassement.On place une couche

TABLEAU 4

Pourcentages pondéraux des fractions granulométriques des sols utilisés

Sable de Fontainebleau	Sable de Fontenay	Horizon B de Versailles
Matière organique : Traces	Matière organique : 0,8	Matière organique : 0,40
	0-2 μ = 5,0	0-2 μ = 29,95
	2-20 μ = 0,9	2-20 μ = 26,95
0-50 μ = Traces	20-50 μ = 1,1	20-50 μ = 41,15
	50-63 μ = 0,2	
50-100 μ = 0,08	63-100 μ = 12,1	
	100-125 μ = 57,5	
100-200 μ = 8,11	125-160 μ = 20,9	
	160-200 μ = 1,5	50-200 μ = 1,15
200-500 μ = 91,00	200 μ = 0,2	
500-1 000 μ = 0,80		
		200-2 000 μ = 0,30

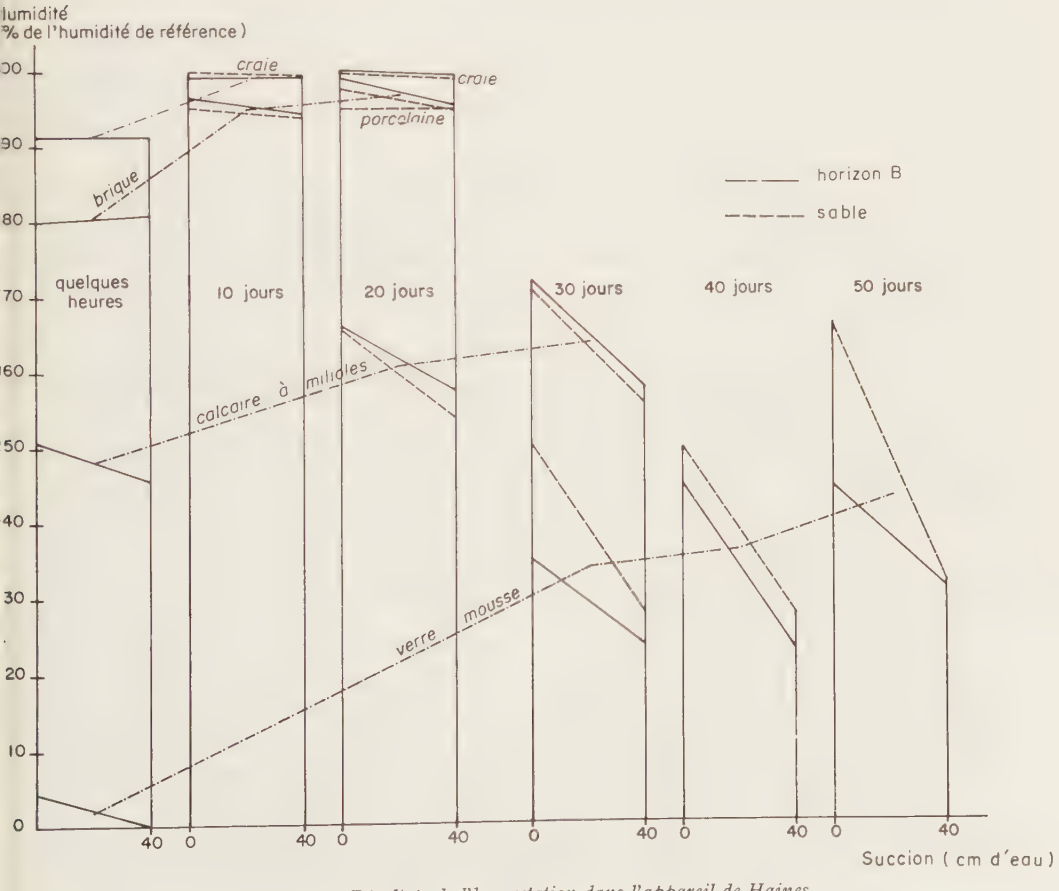


FIG. 41. — *Résultats de l'humectation dans l'appareil de Haines*

de terre que l'on tasse soigneusement, puis l'élément grossier que l'on recouvre ensuite de terre tassée. L'expérience commence lorsque la succion est ajustée à la valeur prévue.

Comme terre, nous avons utilisé, en plus du sable de Fontenay, un matériau plus sableux, le sable de Fontainebleau, et un plus argileux, la terre de l'horizon B de Versailles dont la granulométrie est donnée dans le tableau 4.

Le sable de Fontainebleau est constitué essentiellement de grains de diamètre supérieur à 100 μ. Le sable de Fontenay a une texture plus fine que le matériau précédent, puisque 7 p. 100 de ses particules ont un diamètre inférieur à 50 μ. A la différence des autres matériaux qui ont une structure particulaire, l'horizon B de Versailles a une structure fragmentaire, obtenue ici artificiellement (agrégats de diamètre compris entre 200 μ et 2 mm) ; 88 p. 100 de ses particules ont un diamètre équivalent inférieur à 50 μ.

Les sols à texture grossière sont difficiles à humecter, lorsque l'eau est soumise à une succion supérieure à 45 cm de hauteur d'eau. Nous avons donc utilisé des tensions inférieures à cette valeur qui, au centre de gravité de l'élément rigide étaient de 3,7 à 43,7 cm d'eau et, à la base du büchner, de 0 et 40 cm d'eau.

L'humidité des éléments rigides a été mesurée en général 10, 20, 30, 40 et 50 jours après le début de l'humectation. On dispose cependant, pour certains matériaux, de mesures d'humidité faites quelques heures après le début de l'humectation.

On a pris comme humidité de référence l'humidité du même échantillon submergé à la pression atmosphérique avec précaution en un jour, puis laissé ainsi pendant 30 jours. Les résultats des expériences sont exprimés sous la forme du rapport entre l'humidité observée et l'humidité de référence.

5. 12. *Résultats.*

Ils sont présentés de façon à faire apparaître l'influence des différents facteurs étudiés (fig. 41) ; l'ordonnée des points représente l'humidité des matériaux grossiers en p. 100 de l'humidité de référence. En abscisse, on porte les succions exprimées en hauteur d'eau par rapport à la base du büchner.

Les comportements des éléments rigides sont très différents. On distingue deux groupes selon que l'humidité est supérieure ou inférieure à 90 p. 100 de l'humidité de référence : la craie, la brique et la porcelaine atteignent des humidités supérieures à ce seuil en 10 jours au plus ; les humidités des autres matériaux sont très en deçà de ce seuil, même au bout de 50 jours.

L'influence de la succion à laquelle est soumise l'eau de la terre n'est presque pas appréciable pour les matériaux se remplissant bien ; pour les autres, la quantité d'eau absorbée diminue lorsque la succion augmente.

La nature de la terre n'intervient pas en général de façon sensible, le remplissage étant cependant légèrement meilleur dans le sable. Pour le verre mousse, toutefois, le remplissage est meilleur avec l'horizon B.

L'humidité augmente de façon appréciable avec le temps pour tous les matériaux rigides, mais la valeur plafond est atteinte beaucoup plus rapidement pour le groupe d'éléments se remplissant bien.

L'examen de la figure 41 montre que les effets des différents facteurs ne sont pas indépendants, c'est-à-dire que l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre ; par exemple, pour la durée d'humectation de 20 jours, la différence entre les humidités aux succions 0 et 40 cm d'eau n'est pas la même pour la craie et le calcaire à milioles : il y a interaction entre la succion et la nature du matériau. On ne peut donc étudier l'effet d'un facteur que pour des niveaux définis des autres. Cependant, l'effet de certains facteurs est prépondérant par rapport à l'interaction qui existe entre eux. Pour ceux-ci, du moins, l'examen de leurs effets indépendamment des niveaux des autres facteurs conserve un sens.

Les facteurs principaux sont rangés par influence décroissante : la nature des matériaux grossiers poreux, le temps et enfin la succion pour les matériaux s'humectant difficilement.

5. 2. — *Expériences en tubes avec circulation de l'eau*

Ces expériences, qui reproduisent en partie certaines conditions du milieu naturel, sont destinées à étudier l'action du temps et de la façon de fournir l'eau à la terre sur l'humectation des corps poreux rigides.

5. 21. *Dispositif expérimental et méthode.*

On a utilisé les tubes pleins de sable de Fontenay, déjà décrits (section 1. 1).

L'eau était apportée à chaque tube de façon à réaliser :

— une infiltration suivie de filtration, avec lame d'eau à la surface. Comme on ne peut procéder à des mesures non destructrices de l'humidité du sable, celle-ci n'est pas connue directement. Pendant l'infiltration, le sable est certainement saturé au voisinage de la surface, mais il n'en est certainement pas ainsi au voisinage du front humide, puisque, en moyenne, 75 p. 100 de la porosité sont occupés par l'eau. Une fois la phase d'infiltration terminée, l'humidité du sable est voisine de la saturation;

— une humectation verticale sans plan d'eau. Les dosages d'humidité du sable effectués à la fin de l'expérience et qui constituent, de ce fait, seulement des évaluations des valeurs réelles, donnent des humidités pondérales variant entre 17 et 21 p. 100 au voisinage de l'élément grossier. A ces valeurs correspondent respectivement 54 et 66 p. 100 de la porosité et une succion de 30 à 40 cm d'eau. Lorsque l'eau s'écoule de la base du tube, l'humidité du sable est plus élevée et voisine de la saturation, la disparition de la succion due au sol sec provoquant une augmentation de l'humidité dans le sable.

— une humectation horizontale, l'alimentation en eau se faisant par un tube coudé dont une extrémité plonge dans un récipient à niveau constant (cf. section 1. 61). Les mesures faites à la fin de l'expérience indiquent des humidités de 22 et 24 p. 100 au voisinage de l'élément, ce qui correspond à 78 et 84 p. 100 de la porosité totale et à une succion de l'ordre de 35 cm d'eau. Les humidités au voisinage de la zone d'alimentation sont supérieures à ces valeurs, et c'est l'inverse pour la terre proche du front humide.

Certaines expériences ont duré 10 jours, d'autres 30 jours. Il faut remarquer que, lorsqu'on fait varier la durée des expériences, on met en jeu des variations d'humidité du sable au cours de l'expérience, puisque, comme on l'a vu ci-dessus, en humectation verticale par exemple, l'humidité du sable augmente une fois que le front humide a atteint la base du tube.

Dans le même ordre d'idée, la durée du contact entre l'élément grossier et le sable humide est mal définie. Du fait de la vitesse finie d'avancement du front humide dans le sable, cette durée de contact n'est pas la même pour les différentes parties de l'élément rigide ; elle est évidemment plus longue pour la partie touchée la première par le front humide. Par ailleurs, le front humide dans le sable avance à des vitesses différentes selon les conditions d'alimentation en eau. Il n'est donc pas possible de disposer de durées de contact comparables entre le sable humide et l'élément grossier. Nous avons dû nous contenter de faire en sorte que le temps écoulé entre l'instant où le front humide aborde l'élément et la fin de la manipulation soit de deux heures environ.

Les éléments poreux rigides, en général des prismes à base carrée (2 × 2 × 4 cm), étaient placés dans les tubes au sein du sable, de façon que leurs axes de symétrie longitudinaux coïncident avec ceux des tubes.

5. 22. *Résultats.*

5. 221. *Influence du mode d'humectation.* On a rassemblé dans le tableau 5 les résultats des expériences de courte durée (2 à 5 heures). Les résultats des humectations directes avec précaution (mesures au pycnomètre, 1re partie section 3.1) sont rappelés dans ce tableau.

D'une façon générale, les humectations qui se font par l'intermédiaire du sable aboutissent à des teneurs en eau analogues et donc indépendantes des procédés employés.

La quantité d'eau absorbée par la craie est à peu près constante, quel que soit le type d'humectation.

Les matériaux autres que les billes de verre, rangés par humidité croissante, se classent de la même façon, qu'on les humecte directement ou par l'intermédiaire du sol ; dans ce cas, l'emprisonnement d'air est accentué par rapport à l'humectation directe.

TABLEAU 5

Teneur en eau des échantillons (p. 100 de la porosité ouverte) *après des humectations de genre différent*

Durée : 2 à 5 heures

Mode d'humectation	Matériau				
	Craie (0,8 μ)	Brique (24,5 μ)	Calcaire à milioles (250 μ)	Verre mousse (500 μ)	Billes de verre (1 000 μ)
Humectation directe avec précaution	91,7	75,7	33,0	17,3	100
Tube : Humectation verticale, sans plan d'eau	92,5	71,8-72,0	26,8	0,8-0,8	
Tube : Infiltration verticale, plan d'eau en surface	91,0	73,2		1,6	0
Tube : Humectation horizontale	91,2-99,5				
Büchner succion 40	92,6	78,4	26,1	0,7	
Büchner succion 0	92,7	77,2	28,9	3,3	

Les billes de verre se comportent de façon radicalement différente selon que l'humectation est directe ou non.

5. 222. *Influence de la durée.*

Pour l'élément s'humectant le plus mal, le verre mousse, on a augmenté la durée de contact, puisqu'elle pouvait améliorer le remplissage.

Quel que soit le mode d'humectation, l'humidité de l'élément grossier croît avec le temps dans des proportions considérables (tabl. 6).

Mais l'influence de la durée n'est pas indépendante du mode d'alimentation en eau du sable :

— pour une durée de 10 jours, la quantité d'eau absorbée est plus élevée dans le cas d'infiltration — filtration que dans celui de l'humectation verticale ;

— on obtient à peu près le même résultat avec une humectation verticale de 10 jours et une humectation en büchner de 30 jours à succion nulle.

5. 3. — *Discussion des résultats*

Examinons d'abord les expériences de courte durée du tableau 5. Sauf pour les billes de verre, la plus ou moins grande propension des matériaux à l'emprisonnement d'air (liée au rayon maximum des pores : première partie section 3. 13.) explique une partie des différences de remplissage constatées.

TABLEAU 6

Teneur en eau du verre mousse
(% de la porosité ouverte)

Durée	Fourniture d'eau au sable			
	Humectation verticale, sans plan d'eau	Infiltration, filtration, plan d'eau	Büchner	
			Succion 40	Succion 0
2 à 5 heures	0,8 — 0,8	1,6	0,7	3,3
10 jours	12,1	21,4		
30 jours			7,6	11,4

Pour rendre compte de la part de différences inexpliquées, il faut faire intervenir la succion exercée par les matériaux grossiers. Seuls ceux de leurs pores assez fins pour exercer une succion supérieure à celle produite par le sable se remplissent. Si le rayon maximum des pores est élevé (brique, calcaire à miliolés, verre mousse), une partie des pores seulement se remplit d'eau ; le cas extrême est celui du massif de billes de verre qui n'absorbe pas d'eau en quantité appréciable parce que ses pores sont trop larges. A l'inverse, pour un matériau tel que la craie, même les pores les plus larges exercent une succion (2 185 cm d'eau) largement supérieure à celle à laquelle est soumise l'eau du sable (quelques dizaines de cm d'eau) : la craie se remplit donc presque totalement et d'une façon indépendante de la succion appliquée à l'eau du sol tant qu'elle n'excède pas 2 185 cm d'eau.

Cette indépendance a été vérifiée avec la brique dont les pores les plus larges exercent une succion de 62 cm d'eau : lorsqu'on augmente la succion appliquée à l'eau du sable, la brique absorbe une quantité d'eau indépendante de celle-ci, tant qu'elle reste inférieure à 60 cm d'eau environ ; au-delà de cette valeur la quantité d'eau absorbée diminue rapidement (fig. 42).

Comme les matériaux à pores étroits se remplissent rapidement et presque complètement, la durée de l'expérience n'a pas d'influence appréciable. Par contre, pour les matériaux à pores larges, la quantité d'eau absorbée croît avec le temps. Des explications plausibles ont déjà été données : diffusion de l'air dans l'eau (première partie, section 3. 212.), variations de température d'autant plus probables que le temps écoulé est plus long (première partie, section 2. 26).

Le remplissage plus élevé du verre mousse placé dans le tube en filtration peut s'expliquer par une transmission convenable de la pression hydrostatique (l'humidité du sable est plus proche de la saturation) qui favoriserait l'expulsion de l'air (première partie, section 3. 212.) et ou par l'entraînement de l'air dans l'eau en circulation dans les capillaires, l'air parvenant à ces capillaires par diffusion.

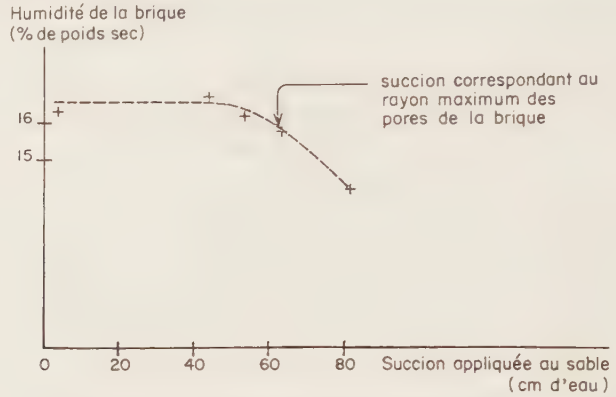


FIG. 42. — *Influence de la succion appliquée au sable sur l'humectation de la brique*

5. 4. — *Conclusions sur l'humectation des éléments grossiers poreux*

La nature de l'élément grossier explique une grande partie des différences de remplissage : le diamètre des pores les plus larges de chaque matériau permet de les classer en deux groupes.

Les matériaux à pores de petit diamètre se remplissent rapidement et de façon presque complète, indépendamment de la succion appliquée à l'eau de la terre (pour la gamme étudiée).

Lorsque le diamètre de leurs pores est plus grand, les matériaux se remplissent plus lentement et d'une façon d'autant plus incomplète que la succcion appliquée à la terre est plus élevée. Le degré de remplissage de ces éléments augmente avec le temps et lorsque l'eau est en mouvement dans la terre.

VI. — HUMECTATION D'UN SOL CAILLOUTEUX

Nous examinons maintenant de façon globale le problème de l'humectation d'une épaisseur de sol sec par une quantité d'eau apportée en surface. Un certain temps après l'apport d'eau, la position du front humide se stabilise, ce qui correspond à une humidité constante de la terre H_1, la capacité au champ ; l'humidité des cailloux atteint également un équilibre. Ce sont les relations entre la quantité d'eau apportée et les paramètres de cet équilibre que nous étudierons.

Une lame d'eau d'épaisseur U (mm) apportée à la surface d'un sol sec amène une épaisseur h (dm) de ce sol à l'humidité H_1 (p. 100 de poids sec) telle que

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1,$$

d_a étant la densité apparente du sol (HÉNIN, 1969).

6. 1. — *Cailloux inertes du point de vue hydrique*

Lorsque les cailloux sont inertes du point de vue hydrique, parce qu'ils ne sont pas poreux ou n'absorbent pas d'eau quoique poreux, on modifie l'expression précédente en substituant à la densité apparente (d_a) la densité apparente partielle de terre fine (d_{ap}), la nouvelle épaisseur humectée étant h', telle que :

$$U = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1$$

La densité apparente partielle de terre fine est le poids de terre fine contenue dans l'unité de volume de sol en place (Bourrier, 1959). Une même quantité d'eau U humecte une épaisseur h de sol sans cailloux et une épaisseur h' du même sol contenant des cailloux.

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1 = d_{ap} \cdot h' H_1 \text{ donne } h/h' = d_{ap}/d_a$$

Comme $d_{ap} < d_a$, $h' > h$. Par exemple, pour $d_a = 1{,}3$ et $d_{ap} = 0{,}8$ $h' = 1{,}6 \cdot h$

Quelle que soit la nature de la terre fine, la présence de cailloux inertes augmente l'épaisseur de sol humectée par une certaine quantité d'eau.

La densité apparente partielle de terre fine dépend de la densité apparente de terre fine et de la proportion en volume de cailloux dans le sol.

6. 2. — *Cailloux actifs du point de vue hydrique*

A l'unité de volume de sol en place correspondent :

— un poids de terre fine d_{ap} qu'on amène à l'humidité H_1 ;

— un poids de cailloux d_{cp} qu'on amène à l'humidité H_c, d_{cp} étant la densité apparente partielle de cailloux (Gras, 1962-1969).

En faisant l'hypothèse que terre fine et cailloux s'humectent simultanément, on a :

$$U = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h' \cdot H_c$$

Pour le même sol sans cailloux, on aurait :

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1$$

Une profondeur h de sol sans cailloux et h' de sol caillouteux sont humectées par la même quantité d'eau U.

$$U = d_a \cdot h \cdot H = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h' \cdot H_c = (d_{ap} \cdot H_1 + d_{cp} H_c)\, h' ;$$

$$\text{d'où } h/h' = d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a)\,(H_c/H_1)$$

Cette formule générale englobe celle qui a été obtenue en 6·1, puisque pour l'obtenir il suffit d'écrire que l'humidité de l'élément grossier est nulle ($H_c = 0$).

Le rapport h/h' dépend de plusieurs paramètres :

$$h/h' < 1 \quad \text{pour} \quad d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a)\,(H_c/H_1) < 1$$

$$h/h' > 1 \qquad\qquad d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a)\,(H_c/H_1) > 1$$

et quoique d_{ap}/d_a soit toujours inférieurs à 1, il est difficile de tirer des conclusions simples de l'examen de cette expression.

On aborde le problème d'une autre façon, en substituant à un volume apparent unité de sol un caillou de même volume : on perd ainsi l'humidité volumique $d_a \cdot H_1$ et on gagne $d_c H_c$, d_c étant la densité apparente du caillou. C'est la comparaison de $d_c \cdot H_c$ et de $d_a \cdot H_1$ qui donnera le sens de la variation

$$\begin{aligned} -d_a \cdot H_1 + d_c H_c > 0 &\quad \text{gain d'humidité volumique} \\ = 0 &\quad \text{invariance d'humidité volumique} \\ -d_a H_1 + d_c H_c < 0 &\quad \text{perte d'humidité volumique} \end{aligned}$$

Par exemple, la présence dans un sol ($d_a = 1{,}3$; $H_1 = 20$) de cailloux pour lesquels $d_c = 2{,}0$ $H_c = 5$, va diminuer le volume de pores occupables par l'eau, la même quantité d'eau humectera alors une épaisseur plus grande de sol que s'il n'y avait pas de cailloux, puisque $-1{,}3 \cdot 20 + 2 \cdot 5 < 0$. Par contre, l'apport de cailloux crayeux ($d_c = 1{,}5$; $H = 24$) augmente le volume de pores utilisables, puisque $-1{,}3 \cdot 20 + 1{,}5 \cdot 24 > 0$; la même quantité d'eau humectera une profondeur moindre de sol.

Ainsi, la valeur par rapport à 1 de l'expression $-d_a \cdot H_1 + d_c H_c$ permet de prévoir si h/h' est inférieur, supérieur ou égal à 1.

En d'autres termes, si le volume pouvant être effectivement rempli par l'eau est plus important dans l'unité de volume apparent de cailloux que dans celui de terre fine, la présence de cailloux diminue la profondeur de sol humectée ; c'est évidemment l'inverse lorsque l'ordre ci-dessus est changé.

Les formules précédentes donnent des ordres de grandeurs parce que, d'une part terre fine et éléments grossiers ne s'humectent pas forcément à la même vitesse et que, d'autre part, elles ne tiennent pas compte de l'influence éventuelle des dimensions des éléments grossiers sur leur degré de remplissage.

SUMMARY

EFFECTS OF THE COARSE CONSTITUENTS ON THE DYNAMICS OF WATER IN A SANDY SOIL

II. – DYNAMICS OF WATER IN A FINE-EARTH/COARSE CONSTITUENTS SYSTEM POSITIVE MOISTURE CHANGES

A pebble-containing soil is a heterogeneous system consisting of two materials, *i. e.*, fine earth and pebbles, also described as coarse constituents.

The dynamics of water in such a system has been investigated experimentally using tubes filled with sandy soil containing coarse constituents of definite geometrical shape.

The effects of these tubes on the kinetics of the moist front creeping forward in an initally dry soil under different water supply conditions, *i. e.*, horizontal influx, vertical or horizontal moistening are investigated. Experimental data were evaluated in the simpler instances on the basis of the laws of hydrodynamics.

After wetting the system, the effect of the coarse constituents on the conveyance of the water by the system is gone into. All constituents curtail the aggregate permeability of the system.

During previous experiments the coarse porous constituents may be moistened by the sand. The variational moisture recorded arises from the nature of the coarse constituents and from the water sucked in by the sandy soil and coarse constituents.

ZUSAMMENFASSUNG

EINWIRKUNGEN DER GROBEN BESTANDTEILE AUF DIE DINAMYK DES IN SANDIGEM BODEN ENTHALTENEN WASSERS

II. — DYNAMIK DES WASSERS IN EINER MISCHUNG VON FEINERDE UND GROBEN BESTANDTEILEN : POSITIVE FEUCHTIKEITSCHWANKUNGEN

Ein Boden, der Kieselsteine enthält, stell ein uneinheitliches System dar, das aus zweierlei Arten von Materie besteht, nämlich aus der Feinerde und den Kieselsteinen, die auch als grobe Bestandteile bezeichnet werden.

Die Dynamik des Wassers in einem solchen System wurde experimentell untersucht, wobei Röhren benutzt wurden, die mit sandigem, grobe Bestandteile von definierter geometrischer Form enthaltendem Boden gefüllt waren.

Zunächst wurde deren Einfluss auf die Kinetik der einen ursprünglich trochenen Sandboden durchdringenden Feuchtigkeit intersucht, und zwar unter verschiedenartigen Bedingungen der Tränkung mit Wasser : Planmässige Infiltration, vertikale und horizontale Befeuchtung. Die Untersuchungsergebnisse wurden in den einfachen Fällen an Hand der Gesetze der Hydrodynamik ausgedeutet.

Nach erfolgter Befeuchtung der Mischung wurde die Einwirkung der groben Bestandteile auf die Ausbreitung des Wassers in der Mischung untersucht. Sämtliche Bestandteile verringern die Gesamtdurchlässigkeit der Mischung.

Im Verlauf der vorausgehenden Versuche konnten die porösen groben Bestandteile sich vom Sand aus mit Feuchtigkeit tränken. Die Schwankungen der registrierten Feuchtigkeit beruhen auf der Natur der groben Bestanditeile sowie auf der von dem Sandboden und den groben Bestandteilen ausgeübten Wasseraufsaugung.

РЕЗЮМЕ

Действие крупных элементов на динамику влаги в песчаной почве.

II. Динамика влаги в системе мелкая почва — крупные элементы : положительные изменения влажности.

Р. ГРА.

Почва заключающая щебень представляет гетерогенную систему состоящую из двух материалов : мелкой почвы и щебня, называемого также иногда крупными элементами. Динамика влаги в такого рода системе изучалась в экспериментах с применением колонок песчаной почвы, заключавшей крупные элементы определенных геометрических форм.

Сперва изучалось их влияние на кинетику фронта смачивания, передвигающегося в исходно сухой песчаной почве, при разлиных условиях водного питания : инфильтрация при поверхностном напоре, горизонтальное или вертикальное увлажнение. Результаты опытов интерпретировались в простых случаях при помощи законов гидродинамики.

В увлажненной системе рассматривалось действие крупных элементов на передачу влаги системой. Все элементы уменьшают ее водопроницаемость.

В пред' идущих опытах крупные пористые элементы увлажнялись от песка. Зарегистрированные изменения влажности зависят от природы крупных материалов, и от всасывающей силы песчаной почвы и крупных элементов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bourrier J., 1959. *Problèmes posés par la présence de cailloux dans les sols irrigués.* Ministère de l'Agriculture. Direction générale du Génie rural et de l'Hydraulique agricole. Imprimerie nationale.

Collis-George S., Hénin S., Kelly J.-A., 1963. Étude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **273**, 242-244.

Courau M., 1967. Modalités de l'infiltration de l'eau dans un milieu poreux : effet de la force de succion. *C. R. Acad. Sci.*, **265**, série D, 862-865.

Courau M., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans des milieux poreux artificiels. *Ann. agron.*, **20**, 5-14.

Féodoroff A., 1965. *Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. Cas d'un sol initialement sec et d'un arrosage sans formation de plan d'eau en surface.* Thèse, Paris.

Gardner W. R., 1958. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. *Highway research Board* SR 40, 78-87.

Gras R., 1962. Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13** (2), 141-174.

Gras R., 1966. L'influence des matériaux poreux rigides sur la circulation de l'eau non saturante dans le sol. *C. R. Acad. Sci.*, **266**.

Gras R., 1969. Les mesures de densités apparentes en sol caillouteux. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, 9- 11.

Hénin S., Gras R. et Monnier G., 1969. *Le profil cultural*, 1 vol., Masson.

Schneebeli, 1966. *Hydraulique souterraine*, 1 vol., Eyrolles.

Swartzendruber D., 1969. The flow of water in unsaturated soils. In J. M. de Wiest (1969). *Flow through porous media.* 1 vol, Academic Press.

De Wiest J. M., 1969. Fundamental principles of ground-water flow in : De Wiest. *Flow through porous media*, 1 vol., Acedamic Press.

Ann. agron., 1972, **23** (4), 379-406.

EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX (*)

III. — Dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments grossiers, variations négatives d'humidité

R. GRAS

Station d'Agronomie.
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78 - Versailles

RÉSUMÉ

Le système terre fine-élément grossier préalablement humecté est soumis à la dessiccation.

Lorsque les éléments grossiers ne sont pas poreux, ils modifient seulement le déplacement de l'eau dans le sable.

Si les éléments grossiers sont poreux, ils cèdent de l'eau au sable sous forme liquide lorsque celui-ci est suffisamment desséché pour que des pores fins puissent se remplir d'eau au détriment de l'élément grossier.

La quantité d'eau qui passe ainsi de l'élément grossier à la terre fine dépend du couple élément grossier-terre fine et de l'humidité de la terre fine.

INTRODUCTION

La dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments grossiers est étudiée ici lorsque le système se dessèche, ce qui correspond aux processus naturels d'évaporation ou d'absorption d'eau par les racines des végétaux.

On examine en particulier le transfert d'eau sous forme liquide de l'élément grossier au sable en voie de dessèchement, parce que un tel transfert permet aux éléments grossiers poreux de contribuer à l'alimentation en eau de la végétation.

L'éventualité d'une extraction directe de l'eau des éléments grossiers par les poils absorbants des racines n'est pas à exclure, mais elle n'a pas été étudiée ici.

(*) Ce travail fait partie d'une thèse de Doctorat d'État soutenue le 21 septembre 1971 à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

I. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS NON POREUX SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU D'UN SOL EN VOIE DE DESSÈCHEMENT

Dans le milieu naturel, le sol à la capacité au champ se dessèche à la suite de l'évaporation directe ou de l'absorption d'eau par les racines des végétaux.

1. 1. — *Dispositif expérimental*

Pour simuler l'effet de l'évaporation ou de l'absorption des racines, on pouvait soumettre une des extrémités d'un tube plein de sable de Fontenay humide au chauffage d'une ampoule électrique. Malheureusement, on provoque ainsi des circulations parasites d'eau à la suite de condensations dans les zones plus froides éloignées de la source de chaleur (Collis-George *et al.*, 1963). Pour éviter cet inconvénient, nous avons extrait l'eau en plaçant du silicagel au contact du sol (Puech, 1966). Au cours de l'expérience, le silicagel s'humidifie et son pouvoir absorbant diminue. On pallie en partie cet inconvénient en utilisant un appareil inspiré de celui de Puech (1969) : l'absorption de l'eau est répartie sur une grande quantité de silicagel qui est renouvelée au contact du sol par le brassage d'une hélice (fig. 1). On peut ainsi extraire l'eau de deux tubes en même temps. L'expérience a duré 7 heures 15 minutes et on a fait tourner les tubes autour de leurs axes horizontaux tous les trois quarts d'heure, afin de diminuer les différences d'absorption dues au fait que le renouvellement du silicagel était moins intense dans la partie inférieure du tube à cause du léger espace libre ménagé pour éviter l'éboulement de la terre du tube. Au cours de l'expérience, on a remplacé une partie du silicagel de l'appareil par du silicagel sec.

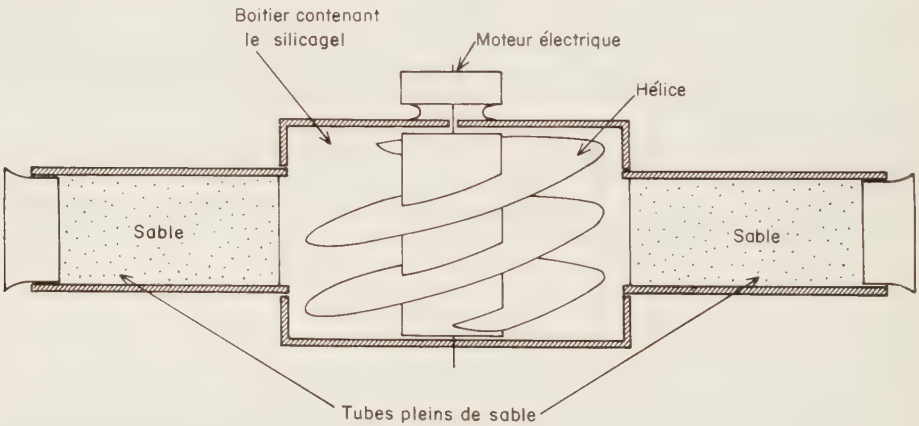


Fig. 1. — *Appareil permettant d'extraire l'eau à l'aide de silica-gel*

On compare un tube témoin et un tube d'essai. Les tubes ont un diamètre intérieur de 5,3 cm et contiennent du sable sur 11 cm d'épaisseur. Ils sont remplis de la façon suivante : le sable est jeté par fraction de 50 g dans le tube partiellement rempli d'eau ; après chaque apport de sable, on élève un peu le niveau d'eau.

Dans le tube d'essai, on place au sein du sable un cylindre de plastique rigide (rayon = 2 cm, hauteur = 4 cm) ; la surface de section occupée par le sable passe ainsi de 22,0 cm² à 9,4 cm² ; pour éviter que ce cylindre ne se déplace à l'intérieur du sable humide, on a utilisé un dispositif ainsi conçu (fig. 2) : le cylindre est attaché par des fils métalliques à un support de fil de fer rigide qui rentre exactement dans le tube. Celui-ci est rempli de sable comme le tube témoin. Une fois le remplissage terminé, l'excès d'eau est enlevé, d'abord par simple égouttage, puis par applica-

tion d'un vide modéré. Le tube est ensuite bouché et placé horizontalement pendant une nuit, pour que son humidité s'homogénéise. Cette façon de procéder permet d'obtenir une humidité du sable plus régulière que celle que l'on obtiendrait en humectant le sable sec par capillarité, ou en laissant se ressuyer le sable préalablement saturé après remplissage à sec.

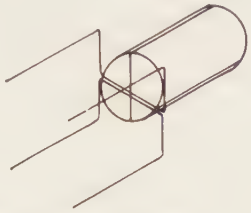


FIG. 2. — *Montage fixant la position de l'élément grossier dans le sable humide*

1. 2. — *Résultats*

On compare le tube d'essai et le tube témoin placés pendant le même temps sur l'appareil à silicagel. La perte d'eau totale de chaque tube a été rapportée à la quantité d'eau totale initiale, qui, pour la même humidité du sable, diffère du tube témoin au tube avec élément, du fait de la présence de ce dernier (tabl. 1).

TABLEAU I

Extraction d'eau par le silicagel

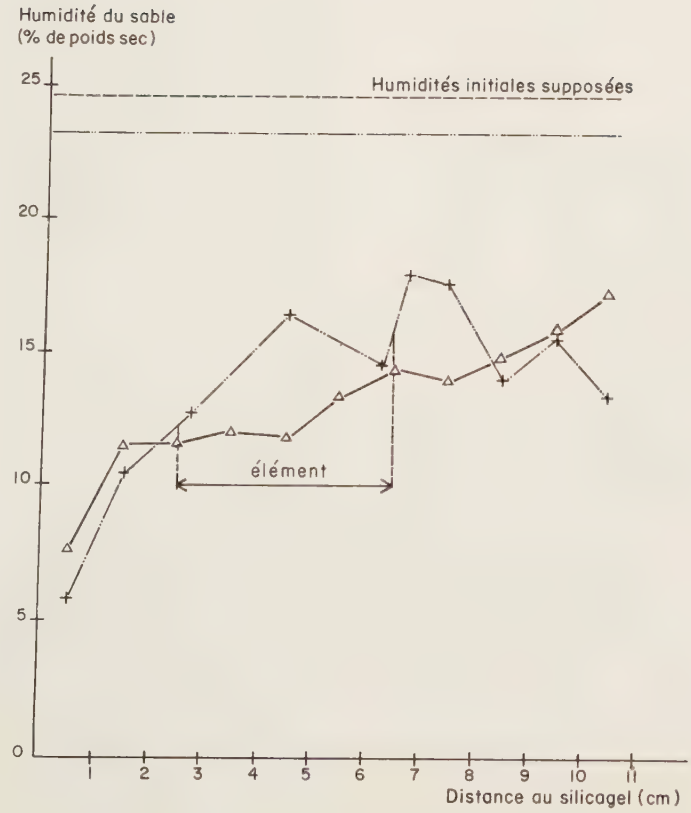
	Tubes	Humidité moyenne initiale du sable (%)	Eau extraite (% de la quantité d'eau initiale)
Expérience 1	Tube témoin..	24,6	19,6
	Tube avec élément	23,2	18,9
Expérience 2	Tube témoin..	43,0	29,2
	Tube avec élément	43,7	27,3

On constate que, pour une expérience donnée, l'humidité initiale en p. 100 de sable sec étant à peu près la même, le rapport de la quantité d'eau extraite à la quantité initiale n'est pas sensiblement modifié par la présence d'un élément grossier non poreux dans le sable.

La figure 3 représente les profils hydriques à la fin de l'expérience. Leur examen fait apparaître les points suivants :

— la présence de l'élément grossier n'empêche pas le dessèchement de se manifester dans la partie du tube la plus éloignée de la zone d'extraction ;

— l'humidité du sable est plus élevée au voisinage de l'élément grossier que dans les parties correspondantes des tubes témoins. Ce supplément d'humidité, parti-



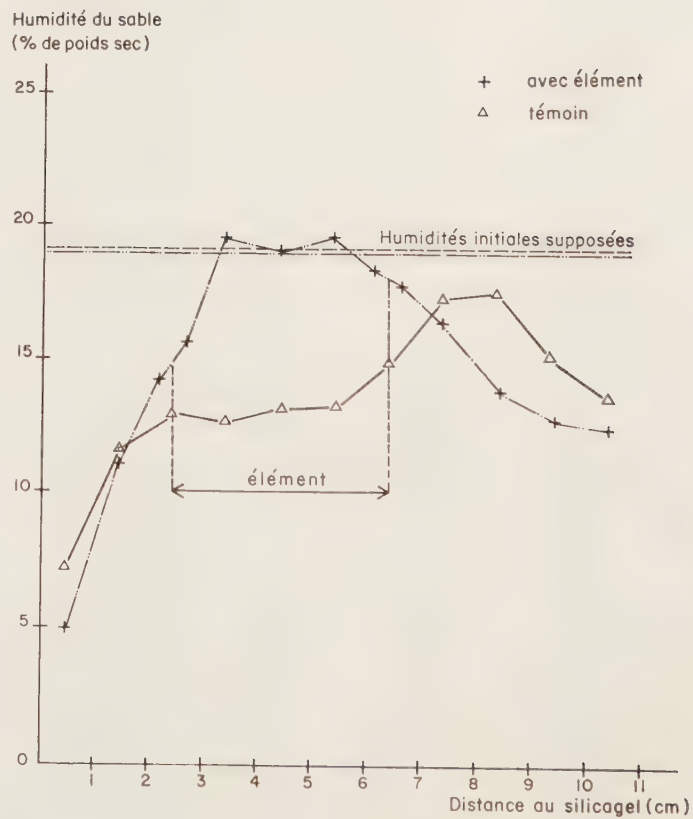


FIG. 3. — *Effet d'un élément grossier non poreux sur la dessiccation d'un sable. Profils hydriques*
a : humidité initiale élevée
b : humidité initiale faible

culièrement net sur la figure 3 *b*, ne peut être attribué au hasard et il est difficile de l'expliquer par une différence de tassement du sable à côté de l'élément. L'eau se déplacerait donc d'une couche relativement sèche vers une couche plus humide, comme l'ont signalé HALLAIRE et HÉNIN (1958). La diminution de section provoquée par l'élément suggère l'existence d'un mécanisme compensateur qui se traduirait par une augmentation de la quantité d'eau en transit dans l'espace annulaire autour de l'élément.

II. — TRANSMISSION D'EAU DE L'ÉLÉMENT RIGIDE AU SABLE

Le transfert d'eau de l'élément poreux rigide au sable peut s'effectuer sous forme liquide ou gazeuse. Dans ce dernier cas, il faut que la tension de vapeur d'eau soit plus faible dans l'espace poral du sable que dans celui de l'élément ; la diffusion provoque alors le transfert de certaines molécules d'eau du corps poreux vers le sable. Ce mécanisme peut coexister avec le transfert sous forme liquide, la vapeur d'eau pouvant se condenser dans des pores si la température y est suffisamment basse.

Le transfert sous forme gazeuse peut avoir quelque importance dans des conditions particulières, mais il est probable que le transfert sous forme liquide met en jeu des quantités d'eau plus grandes que la diffusion de la vapeur. Par ailleurs, c'est sous la forme liquide que l'eau intervient le plus efficacement pour la nutrition minérale et l'alimentation en eau ; l'eau passe alors de l'élément grossier au sol et du sol à la racine. Pour toutes ces raisons, nous nous limiterons au transfert isotherme d'eau sous forme liquide.

Pour étudier ce transfert, on réalise un dispositif expérimental qui, en diminuant la teneur en eau du sable autour de l'élément, rend possible un déplacement éventuel de l'eau de l'élément vers le sable. Il s'agit donc, en principe, de dessécher le sable et d'examiner si l'élément grossier qui s'y trouve perd alors de l'eau.

En fait, une telle expérience ne saurait montrer sans ambiguïté que le transfert s'est effectué sous forme liquide, puisqu'un corps poreux peut perdre de l'eau du seul fait de l'évaporation, pourvu que l'expérience dure assez longtemps.

Pour savoir sous quelle forme l'eau se déplace, on remplit alors l'élément poreux rigide d'eau marquée avec un sel, qui se déposera dans le corps rigide si l'eau s'y évapore (transfert gazeux), ou au contraire se déplacera avec elle dans le sable où on le retrouvera (transfert liquide). Mais, même en l'absence de tout mouvement de l'eau, le marqueur se déplacera par diffusion, de façon que sa concentration tende à devenir la même pour l'eau de l'élément grossier et l'eau du sable. Il faut donc disposer d'un témoin permettant d'évaluer la teneur en sel dans le sable au voisinage du corps grossier, en l'absence de tout mouvement de l'eau ; ce témoin est difficile à réaliser puisque, au cours de l'expérience, la teneur en eau diminue constamment dans le sable, ce qui modifie l'intensité de la diffusion par l'intermédiaire de la section occupée par l'eau.

Nous avons donc mis d'abord en évidence de façon qualitative qu'il y avait bien un transfert d'eau sous forme liquide ; par la suite, on a précisé l'importance quantitative de ce transfert.

2. I. — *Mise en évidence d'un transfert d'eau sous forme liquide*

2. II. *Méthode.*

On a utilisé le procédé décrit dans la section 1. 1. Il consiste à dessécher le tube de sol par une de ses extrémités au moyen de silicagel.

Lorsqu'on essaie de remplir le tube avec du sable préalablement humecté, qui est de ce fait agrégé, on est obligé de tasser le sable pour rendre le remplissage régulier, mais ce faisant on exprime en partie l'eau des agrégats et on crée ainsi une distribution très irrégulière de l'eau. On pourrait alors remplir le tube en versant le sable dans l'eau, comme cela a été décrit dans la section 3. 11 de la 2e partie ; mais la solution saline de l'élément poreux rigide risque de se diluer par diffusion du sel dans l'eau du récipient, cette dilution affectant vraisemblablement plus la périphérie de l'élément que son centre ; la concentration en sel de la solution emplissant l'élément n'étant plus constante, le marquage perdrait toute signification.

Le dispositif expérimental a donc été modifié comme suit (fig. 4) : le contact entre le sable et l'élément rigide se fait par une face seulement de celui-ci ; des précautions particulières ont été prises pour éviter les pertes d'eau par évaporation à partir des autres faces de l'élément.

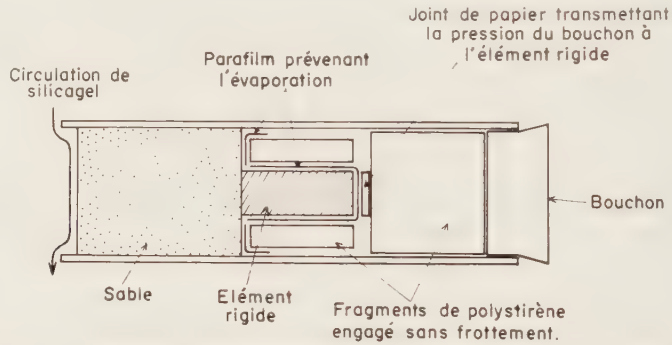


Fig. 4. — *Dispositif expérimental réalisé pour mettre en évidence la cession d'eau sous forme liquide d'un élément rigide au sable*

Les succions mises en jeu sont relativement faibles, puisque, au bout de 6 heures de ressuyage, la succion maximum appliquée à l'eau du sable au voisinage de l'élément grossier est de 50 cm d'eau seulement. Pour obtenir des succions plus élevées, la durée de l'expérience aurait dû être beaucoup plus longue, mais à ce moment-là, nous verrons que la diffusion du marqueur aurait considérablement compliqué l'interprétation des résultats.

Pour marquer l'eau, nous avons utilisé le Cl_2Ca, 2 H_2O à une concentration de 1 p. 100, le calcium étant préféré au sodium, afin de ne pas provoquer la dispersion des colloïdes du sol. Le chlore a été dosé par potentiométrie, à l'aide de nitrate d'argent, sur la suspension obtenue en jetant la terre dans l'eau (Annexe 9).

Au cours de l'expérience trois tubes ont été utilisés :

— un tube témoin plein de terre humide ;
— un tube d'essai avec l'élément rigide ;
— un tube avec élément rigide pour évaluer la diffusion du marqueur en l'absence de mouvement de l'eau.

Les deux premiers tubes, dont le sable avait la même humidité pondérale (22,8 p. 100), ont été soumis à l'absorption par le silicagel pendant 6 heures.

Le dernier tube, identique au tube d'essai, a été bouché hermétiquement pour supprimer tout mouvement d'eau. La teneur en chlore dans le sable a été mesurée au bout de 6 heures également. La quantité de chlore qui se déplace par diffusion est proportionnelle à la surface de section à travers laquelle les ions diffusent, ici la fraction de la surface de section du sable occupée par l'eau, fraction plus grande que dans le tube d'essai, duquel on extrait de l'eau. De ce fait, les quantités de chlore qui ont diffusé dans le dernier tube constituent une limite supérieure des quantités qu'on aurait obtenues si on avait pu y réaliser les mêmes humidités que dans le tube d'essai, sans provoquer de mouvement en masse de l'eau.

2. 12. *Résultats.*

Une expérience a été réalisée avec un massif de billes de verre de diamètre compris entre 50 et 63 μ : la quantité d'eau cédée par les billes de verre a été quasi nulle. Il est vraisemblable que ce résultat est dû au fait que la succion de l'eau dans le massif est beaucoup trop élevée par rapport à la succion à laquelle était soumise l'eau du sable humide.

Une autre expérience a été réalisée en utilisant un prisme constitué de billes de plus grand diamètre (200-225 μ). Celui-ci a cédé 92,3 p. 100 de son eau et on a retrouvé du chlore jusqu'à l'extrémité de l'échantillon de sol, long de 4 cm dans cet essai ; la concentration en chlore s'élève brutalement au voisinage du silicagel (fig. 5), ce qui indique une perte d'eau par évaporation au voisinage du contact silicagel-sable.

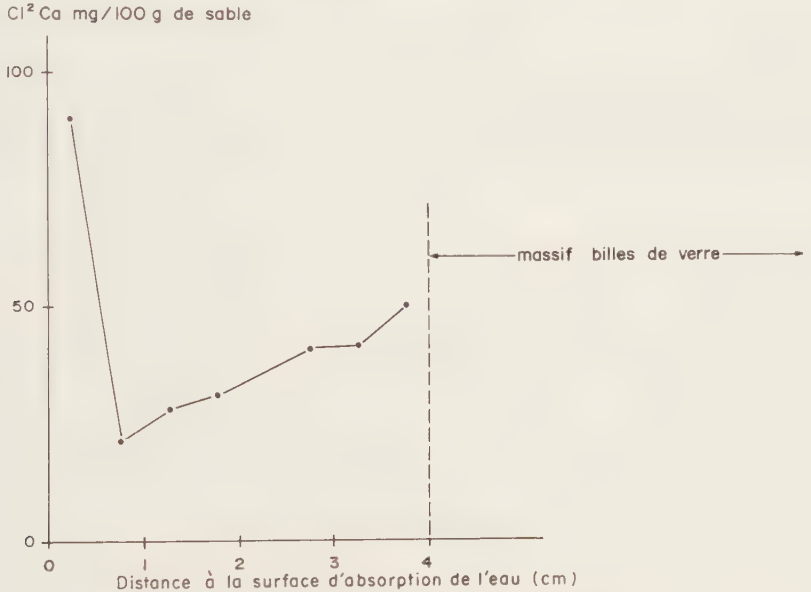


FIG. 5. — *Transfert d'eau sous forme liquide d'un massif de billes de verre au sable*
Teneur en chlore de la terre pour le tube d'essai, épaisseur de sable : 4 cm.

L'expérience a été recommencée en portant la longueur de l'échantillon de sable à 6 cm, de façon que l'eau salée provenant du massif de billes de verre ne parvienne pas jusqu'à extrémité du tube soumise à l'extraction d'eau ; on pouvait ainsi évaluer la longueur du trajet parcouru dans le sable par l'eau salée venue de l'élément rigide.

Ce sont les résultats de cette expérience qui sont représentés sur la figure 6. Le fait important est qu'on retrouve du chlore dans le sable jusqu'à 5,5 cm de la paroi du massif de billes de verre, distance de beaucoup supérieure à celle obtenue avec le témoin sans ressuyage : 2,5 cm, évaluation par excès de la distance parcourue par le chlore du seul fait de la diffusion. Ceci montre sans ambiguïté que le massif de billes de verre cède de l'eau sous forme liquide à un sable en cours de dessèchement, la perte d'eau du massif poreux étant de 92,4 p. 100 de sa teneur au début de l'expérience.

Les profils hydriques dans le sable sont assez semblables en l'absence ou en présence d'un massif de billes de verre, ce qui est à première vue assez surprenant.

Il est vraisemblable que la présence du massif de billes de verre modifie la dynamique du transfert d'eau du sable et que, dans ces conditions, la seule comparaison de profils hydriques à un même moment est insuffisante pour comprendre le processus mis en jeu.

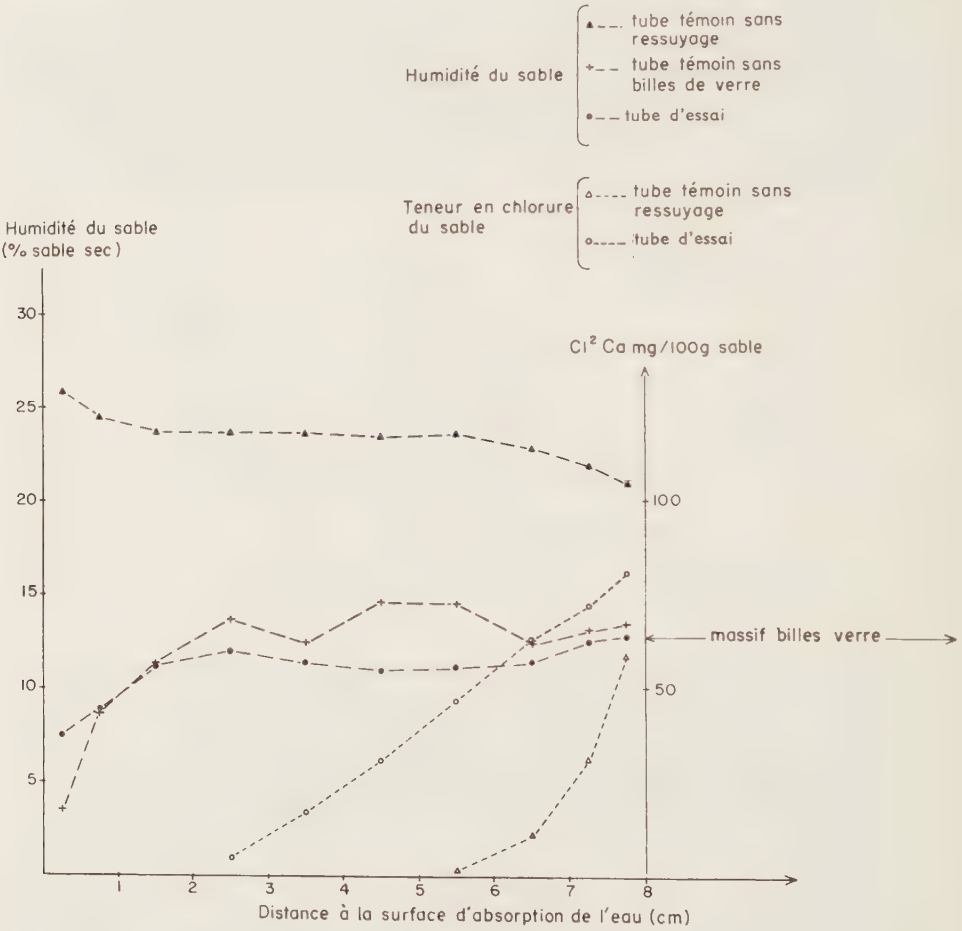


FIG. 6. — *Transfert d'eau sous forme liquide d'un massif de billes de verre au sable : profils hydriques et teneurs en chlore du tube d'essai et du tube témoin, épaisseur de sable : 8 cm.*

2. 2. — *Quantité d'eau transférée et nature des matériaux grossiers et de la terre*

Cette étude a été conduite sur quatre matériaux : craie, pierre ponce, verre mousse et brique, en utilisant deux sols : le sable de Fontenay et le sable de Fontainebleau, plus grossier que le précédent, décrits dans la section 5. 11. de la deuxième partie.

Les expériences ont été réalisées en ressuyant le sol à l'aide de pressions pneumatiques relativement basses : 3 000 g cm² au maximum, et d'une pression élevée : 16 000 g/cm², dans un appareil à plaque ou à membrane (fig. 7). Comme, pour des raisons de résistances mécaniques, l'enceinte à haute pression est plus petite que l'enceinte à basse pression, on a utilisé des échantillons de dimensions différentes : des prismes à base carrée de dimensions 5 × 5 × 2 cm pour le ressuyage basse pression et des cylindres plats (diamètre : 28 mm, hauteur : 6 mm) pour le ressuyage haute pression. Comme les dimensions des éléments sont différentes, on ne peut comparer les résultats obtenus dans les expériences à basse et à haute pressions.

Nous n'avons pas utilisé de marqueur, car compte tenu de la durée des expériences (plusieurs jours), l'importance de la diffusion du marqueur aurait rendu les comparaisons avec le témoin quasi impossibles.

2. 21. *Les expériences à basse pression.*

Les échantillons préalablement humectés sous vide ont été disposés dans du sable saturé d'eau placé dans des cylindres reposant sur la plaque poreuse ; l'ensemble a été laissé dans l'eau pendant une nuit. Ensuite, on a ressuyé le sable jusqu'à obtention de l'équilibre, ce qui a demandé 30 jours.

2. 211. *Enrobage avec le sable de Fontenay.*

Les résultats sont exprimés en rapportant l'humidité après ressuyage à l'humidité au début de l'expérience. Ils sont présentés sur la figure 8 pour cinq pressions de ressuyage.

La craie ne cède de l'eau de façon appréciable qu'à une pression supérieure à 2 000 g/cm², et à 3 000 g cm² il reste encore 88 p. 100 de l'eau existant initialement.

La brique ne cède pas d'eau aux faibles pressions, mais conserve seulement 10 p. 100 environ de son humidité initiale à 3 000 g/cm².

La pierre ponce commence à libérer de l'eau à des pressions supérieures à 100 g/cm².

Les différentes formes de courbe humidité-pression de ressuyage s'interprètent en comparant les succions exercées sur l'eau de l'élément grossier par ses propres pores et les pores du sable.

Le verre mousse cède presque 20 p. 100 de son eau initiale à une pression de 100 g /cm².

Les pores du sable n'exercent une succion qu'une fois qu'ils sont vides ; lorsqu'on augmente la pression appliquée, ce sont d'abord les gros pores du sable qui se vident, parce que l'eau y est moins fortement retenue, puis ceux qui sont un peu plus petits, et ainsi de suite. L'élément grossier cédera de l'eau lorsqu'elle y sera retenue par une succion inférieure à celle exercée par les pores du sable. Les courbes de répartition des rayons équivalents des pores des éléments grossiers (1) permettent de retrouver les principaux traits des courbes humidité-pression : la craie ayant des pores très fins ne cède de l'eau qu'à des pressions assez élevées ; la brique, qui a des pores plus larges que ceux de la craie, cède de l'eau plus facilement, mais comme le rayon minimum des pores est beaucoup plus grand que pour la craie, la quantité d'eau restant à la pression de 3 000 g/cm² est très faible ; les deux autres matériaux

(1) Fig. 4, de la première partie.

ont des courbes humidité-pression parallèles, comme le sont leurs courbes de répartition des diamètres équivalents ; on s'explique cependant mal la différence de comportement entre la pierre ponce et le verre mousse, alors que le rayon maximum des

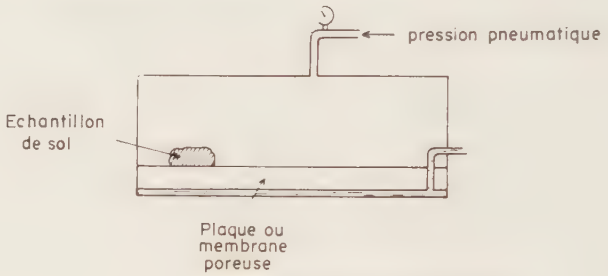


FIG. 7. — *Appareil à plaque ou à membrane*

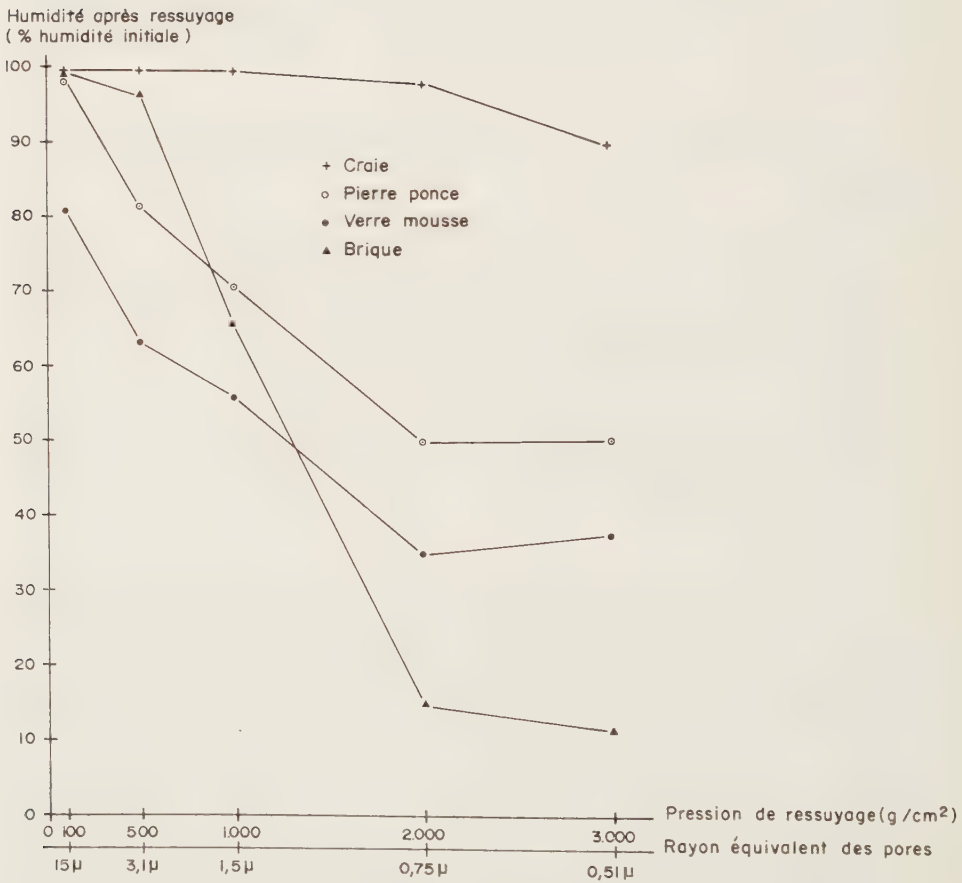


FIG. 8. — *Dessèchement d'éléments grossiers placés dans du sable humide ressuyé à des pressions différentes*

pores est du même ordre de grandeur ; cette différence tient probablement à ce que les pores plus petits mettant en communication les gros pores ont des diamètres différents dans les deux matériaux (cf. première partie).

2. 212. *Enrobage avec le sable de Fontainebleau.*

L'expérience a été réalisée à une seule pression : 3 000 g/cm².

La quantité d'eau cédée est nulle pour tous les échantillons, sauf la pierre ponce, de laquelle 11 p. 100 seulement de l'eau initiale a été extraite.

Il y a donc une influence très importante de la texture du matériau d'enrobage sur l'aptitude des éléments grossiers à lui céder de l'eau.

Globalement, on peut interpréter les différences entre les quantités d'eau cédées par le fait que le sable de Fontainebleau étant plus grossier que le sable de Fontenay, exerce, une fois desséché, une succion moins forte sur l'eau contenue dans l'élément grossier. Dans le cas de l'enrobage avec le sable de Fontainebleau, il reste cependant à expliquer que, quoique le verre mousse et la pierre ponce aient des dimensions maxima des pores du même ordre de grandeur, seule la pierre ponce cède de l'eau.

Le fait que, pour le sable de Fontainebleau, la perte d'eau des éléments poreux rigides soit quasi nulle renforce l'opinion selon laquelle il y a cession d'eau sous forme liquide des éléments au sable de Fontenay. Si la perte d'eau des éléments placés dans le sable de Fontenay provenait uniquement de l'évaporation, on conçoit difficilement que celle-ci ne se produise pas aussi dans le sable de Fontainebleau. En effet, compte tenu de sa granulométrie, les pores dans lesquels diffuserait la vapeur d'eau y sont plus larges que pour l'autre sable.

2. 22. *Les expériences à haute pression.*

Les matériaux grossiers préalablement façonnés en forme de cylindres plats ont été saturés d'eau sous vide, puis placés dans des anneaux contenant du sable saturé, comme l'indique la figure 9. Les anneaux étaient posés sur une membrane poreuse dans une enceinte où la pression pneumatique de 16 kg/cm² a été appliquée.

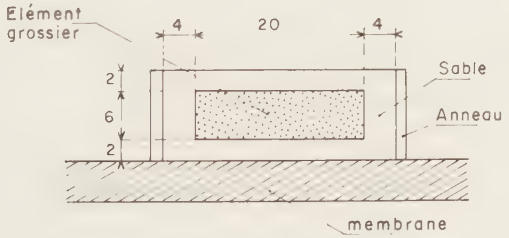


FIG. 9. — *Coupe du dispositif de ressuyage dans l'appareil à membrane*

Cette valeur de 16 kg/cm² a été retenue parce que, en ressuyant les sols saturés sous cette pression, on les amène à l'humidité correspondant approximativement au point de flétrissement.

Pour comparer l'effet de la nature de la terre, on a placé pour chaque matériau

grossier un fragment dans du sable de Fontenay et un autre dans du sable de Fontainebleau. Les ressuyages ont été réalisés au cours de la même expérience qui a duré 2 jours.

TABLEAU 2

Humidité après ressuyage. P. 100 d'humidité à saturation

	Brique	Craie	Pierre ponce
Sable de Fontainebleau	100	100	81,7
Sable de Fontenay	4,9	3,5	31,6

Les résultats du tableau 2 montrent une grande analogie avec ce qui a été obtenu pour les expériences à basse pression : les éléments grossiers perdent de l'eau lorsqu'ils sont enrobés dans le sable de Fontenay, alors que dans le sable de Fontainebleau, la perte est nulle.

2. 3. — *L'influence de la texture du matériau d'enrobage sur le transfert d'eau de l'élément grossier au sol*

Les expériences précédentes montrent que, pour un intervalle de dessiccation du sol correspondant à des succions extrêmes de 100 g/cm² et 16 000 g/cm², la texture du sol intervient sur la quantité d'eau cédée par les éléments grossiers, cette quantité étant nulle pour le sable à texture la plus grossière. Nous allons préciser cet effet de la texture du matériau d'enrobage au moyen de deux expériences.

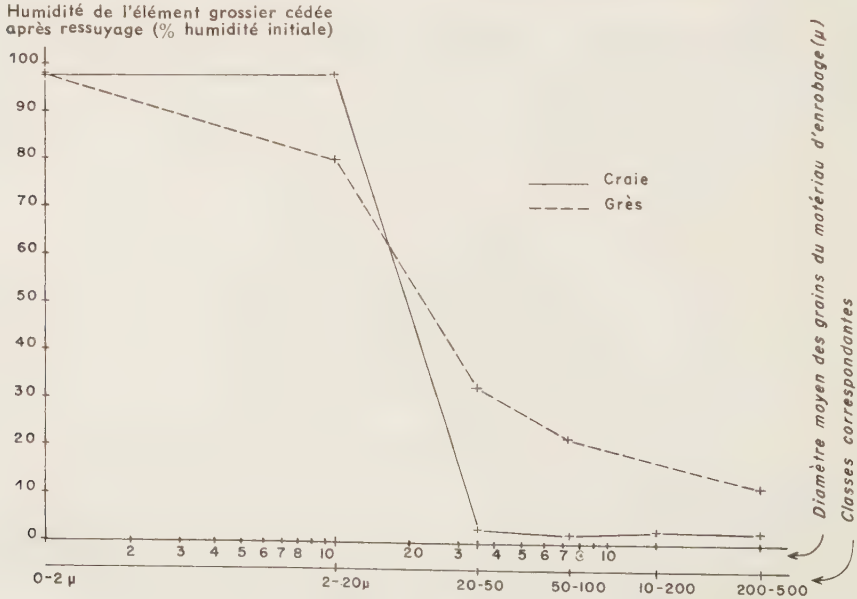


FIG. 10. — *Influence de la texture du matériau d'enrobage sur la cession d'eau*
Grès et craie. Ressuyage sous une pression de 16 kg/cm²

L'une d'elles consiste à ressuyer dans un appareil à membrane, sous 16 kg/cm² de pression, des fragments de craie placés dans trois terres différentes : un sable de Fontainebleau, un limon (16 p. 100 d'argile, 19 p. 100 de limon 2-20 μ) et une terre argileuse (46 p. 100 d'argile). Les quantités d'eau cédées par la craie sont nulles pour le sable de Fontainebleau, importantes et du même ordre de grandeur pour les autres terres (Gras *et al.*, 1963).

L'autre expérience (Gras *et al.*, 1962) a permis de mieux analyser l'effet de la dimension des particules de la terre. A cet effet, on a utilisé des matériaux meubles constitués de fractions extraites du sol : 0-2 μ, 2-20 μ, 20-50 μ, 50-100 μ, 100-200 μ et 200-500 μ. Les matériaux grossiers étaient de la craie et un grès, le ressuyage se faisait sous 16 kg cm² de pression. Pour la craie, le transfert d'eau est négligeable lorsque le diamètre des particules est supérieur à 20 μ. Pour le grès, la quantité d'eau cédée diminue plus progressivement lorsque la taille moyenne des grains des fractions augmente (fig. 10). La cession d'eau d'un élément grossier à la terre dépend donc bien de sa texture.

Il est important de noter que le sable de Fontenay, auquel tous les éléments grossiers cèdent de l'eau, est pauvre en fractions fines : 0-2 μ = 5 p. 100, 2-20 μ = 0,9 p. 100, 20-50 μ = 1,1 p. 100. On peut donc penser que pour que les sols puissent recevoir de l'eau des éléments grossiers, il suffit qu'ils possèdent quelques éléments fins, ayant une force de succion suffisante.

III. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA QUANTITÉ D'EAU EMMAGASINÉE PAR LE SOL

Dans la 2e partie, on a vu que, pour le calcul de l'humidité volumique d'un sol contenant des éléments grossiers inertes, on utilise la densité apparente partielle de terre fine (d_{ap}) ; la quantité d'eau exprimée en lame d'eau équivalente (mm), retenue dans une couche de sol d'épaisseur h (dm) amenée à l'humidité H_1, est U (mm) = $d_{ap} \cdot h$ (dm) · H_1 (p. 100 de poids sec). Rappelons aussi que, lorsque les éléments grossiers absorbent de l'eau, U s'exprime de cette façon :

$$U = d_{ap} \cdot h \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h \cdot H_c,$$

H_c étant l'humidité des éléments grossiers et d_{cp} la densité apparente partielle de cailloux.

Évaluons la quantité d'eau disponible pour la végétation dans une épaisseur de sol h exploitée par les racines des végétaux (1), le sol étant à la capacité au champ. Lorsque l'humidité du sol passe de la capacité au champ H_1 au point de flétrissement H_2, l'épaisseur h de sol cède la quantité d'eau $d_{ap} \cdot h \cdot (H_1 - H_2)$. Les éléments grossiers cèdent à la plante par l'intermédiaire du sol une certaine quantité d'eau, lorsque ce dernier se dessèche de la capacité au champ au point de flétrissement. On ne peut parler de capacité au champ et de point de flétrissement pour les éléments grossiers, puisque la nature du sol intervient sur l'équilibre d'humidité qui s'établit entre l'élément grossier et le sol. On mesure donc l'humidité existant dans le caillou lorsqu'il y a équilibre hydrique entre lui et la terre amenée à la capacité

(1) On admet que les racines ne retirent pas directement l'eau des cailloux.

au champ, et de même l'humidité du caillou en équilibre d'humidité avec la terre au point de flétrissement. Ces deux humidités du caillou sont caractéristiques du couple caillou-matériau d'enrobage ; leur différence H_{cu} est la contribution des cailloux à l'alimentation de la plante lorsque celle-ci dessèche la terre fine de la capacité au champ au point de flétrissement. On a donc :

$$U\ (mm) = (d_{ap} \cdot (H_1 - H_2) + d_{cp} \cdot H_{cu})\ h.$$

Nous allons maintenant donner quelques ordres de grandeur de la contribution des éléments grossiers à l'alimentation en eau des végétaux (Gras *et al.*, 1963) :

— sol sablo-caillouteux des terrasses de la vallée du Rhône, épais de 50 cm, comprenant 43 p. 100 de cailloux en poids :

terre fine	$d_{ap} = 1{,}0$	$H_1 - H_2 =$	9
cailloux	$d_{cp} = 0{,}7$	$H_{cu} =$	8
Contribution	terre fine : $1{,}0 \times 5 \times 9$	=	45 mm
	cailloux : $0{,}7 \times 5 \times 8$	=	28 mm
	Total	=	73 mm

— sol sableux sur schiste : les cailloux sont des fragments de schiste altéré, profondeur 70 cm.

	$d_{ap} = 1{,}1$	$H_1 - H_2 =$	9,5
	$d_{cp} = 1{,}0$	$H_{cu} =$	4,2
Contribution	terre fine : $1{,}1 \times 7 \times 9{,}5$	=	73 mm
	cailloux : $1{,}0 \times 7 \times 4{,}2$	=	29 mm
	Total	=	102 mm

— sol limoneux sur craie, épais de 40 cm

	$d_{ap} = 1{,}3$	$H_1 - H_2 =$	13,3
	$d_{cp} = 0{,}40$	$H_{cu} =$	25,0
Contribution	terre fine : $1{,}3 \times 4 \times 13{,}3$	=	69 mm
	cailloux : $0{,}4 \times 4 \times 25$	=	40 mm
		=	109 mm

Dans ces deux derniers cas, on ne tient pas compte de l'eau fournie par la couche superficielle du substratum crayeux, ou de l'horizon de départ constitué de schiste altéré.

Il faut remarquer que l'eau des cailloux ne passe dans le sol que lorsqu'il est parvenu à un certain stade de dessèchement. Par exemple, la craie ne cède de l'eau au sable qu'une fois que celui-ci a été fortement desséché. Ceci a des conséquences différentes suivant les situations. En présence des seules précipitations, la craie contribue à l'alimentation en eau des plantes spontanées ou cultivées et constitue même un facteur de résistance à la sécheresse, puisque son eau est cédée progressivement. Par contre, dans le cas d'une agriculture intensive où l'on irrigue avant que le sol soit suffisamment sec pour extraire de l'eau de la craie, celle-ci se comportera comme un lest inerte.

IV. — CONCLUSION

L'emploi d'un marqueur a permis de montrer qu'en conditions isothermes, l'eau passe sous forme liquide d'un élément rigide poreux au sable en voie de dessèchement. Il est vraisemblable que la plus grande partie des transferts d'eau des éléments grossiers à la terre se font sous cette forme en conditions naturelles. Ceci n'exclut pas le transfert en phase vapeur dans les conditions non isothermes.

Le transfert d'eau peut se décrire ainsi : lorsque le sol se dessèche, ses pores les plus larges se vident les premiers, le dessèchement affectant par la suite des pores de plus en plus fins. Lorsque les pores de la terre ainsi vidés ont un diamètre équivalent suffisamment petit pour exercer une succion supérieure à celle qui retient l'eau dans le corps rigide, cette dernière se déplace vers la terre.

Ceci met en évidence l'importance des diamètres des pores de la terre et de l'élément rigide. Si la terre a une texture trop grossière, le transfert d'eau est nul. La terre doit donc contenir une certaine quantité de matériaux fins pour que ce transfert soit possible ; dans ce dernier cas, plus les pores de l'élément grossier seront étroits, plus la terre devra être desséchée, de façon que ses pores fins se vident et puissent alors extraire de l'eau de l'élément.

La quantité d'eau cédée par l'élément grossier à la terre fine dépend du couple terre fine élément grossier.

CONCLUSION GÉNÉRALE [1]

Un sable contenant des cailloux est un système hétérogène constitué de deux fractions, la terre fine et les cailloux ou éléments grossiers. Les propriétés hydriques d'un tel sol dépendent de la proportion des deux matériaux, de leurs propriétés et de leurs interrelations.

La porosité ouverte des éléments grossiers se remplit plus ou moins d'eau, même lorsqu'on opère avec précaution à la pression atmosphérique ; une fois l'équilibre atteint, la fraction de la porosité ouverte occupée par l'air est caractéristique de chaque matériau. Une régression positive existe entre la fraction de porosité ouverte occupée par l'air et le rayon maximum des pores pour l'ensemble des matériaux. Une étude des mécanismes d'emprisonnement d'air a révélé que le rayon maximum des pores n'intervient pas directement, mais en tant qu'indice de l'irrégularité de l'espace poral de chaque matériau, irrégularité favorisant l'emprisonnement d'air.

La dynamique de l'eau dans les cailloux poreux placés dans le sable concerne leur humectation par l'intermédiaire du sable et leur dessèchement au profit du sable.

Dans la phase d'humectation, une fois l'équilibre atteint, on constate que la fraction de la porosité ouverte des cailloux occupée par l'eau est très variable selon

[1] Pour les parties I, II et III.

leur nature. La plus ou moins grande propension des matériaux à l'emprisonnement d'air explique une partie de ces différences. Mais la plus grande partie de ces différences s'explique par les succions exercées sur l'eau par les pores du sable et par ceux de l'élément grossier, l'eau se déplaçant vers le milieu où la succion est la plus élevée : les matériaux étudiés ici dont la mouillabilité varie peu, se remplissent donc d'autant plus complètement aux dépens du sable que leurs pores sont plus étroits.

Le passage de l'eau sous forme liquide du caillou au sable est aussi sous la dépendance des succions exercées par le sable et l'élément grossier. Le transfert d'eau se produit chaque fois que se sont vidés des pores du sol suffisamment fins pour exercer sur l'eau de l'élément grossier une succion supérieure à celle qui l'y retient. La quantité d'eau ainsi cédée par l'élément n'est pas caractéristique de l'élément, mais du couple terre fine-élément grossier.

La présence au sein du sable d'un élément grossier modifie la cinétique du front humide qui se déplace dans le sable initialement sec. Les éléments grossiers poreux qui s'humectent au détriment du sable sont qualifiés d'actifs. Par contre, ceux qui n'absorbent pas d'eau parce que leurs succions sont insuffisantes ou qu'ils ne sont pas poreux sont appelés inactifs.

Examinons d'abord les modifications apportées à la cinétique du front humide lorsqu'il passe au niveau de l'élément. Les matériaux inactifs provoquent une augmentation de vitesse du front humide en réduisant le volume de sable à humecter. Les éléments actifs tendent d'une part à augmenter la vitesse du front humide comme ci-dessus, d'autre part à la diminuer en consommant de l'eau qui n'est plus disponible pour humecter le sable. Les valeurs relatives de ces effets de sens opposé déterminent le sens de la variation de vitesse, du moins dans les cas simples.

Une fois que le front humide est au-delà de l'élément, on constate deux types de changements : la vitesse du front humide diminue ou reprend la valeur qu'elle avait avant que le front ne soit parvenu à l'élément. On a l'un ou l'autre de ces comportements suivant le mode d'alimentation en eau du système.

Toutes les conclusions précédentes sont valables dans les cas où les éléments grossiers ne modifient pas la porosité du sable à leur voisinage. Les difficultés rencontrées pour réaliser cette condition dans nos expériences suggèrent que dans la nature les cailloux peuvent modifier les propriétés de la terre à leur voisinage.

Reçu pour publication en novembre 1971.

REMERCIEMENTS

C'est à M. le Doyen Millot, directeur du Centre de Sédimentologie et de Géologie de surface du C. N. R. S., que je dois de pouvoir soutenir cette thèse à la Faculté des Sciences de Strasbourg. Il a bien voulu, malgré ses lourdes charges, présider le jury de ma thèse. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance.

Je remercie M. le Professeur Wey de l'École supérieure de Chimie de Mulhouse qui a accepté d'examiner cette thèse.

Ce travail a été réalisé à l'Institut national de la Recherche agronomique. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à M. Bustarret, directeur général de cet organisme et à M. Drouineau, inspecteur général qui m'ont permis d'entreprendre ces recherches.

M. le Professeur Hénin, chef du Département d'Agronomie de l'I. N. R. A., a assuré ma formation tant dans le domaine scientifique que dans celui de la recherche, d'abord à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer, puis au Laboratoire des Sols où il m'a accueilli.

C'est lui qui est à l'origine de ce travail, qu'il a ensuite orienté et enrichi au cours de fréquents échanges de vue. Il a bien voulu accepter d'être le rapporteur de ma thèse. Je suis heureux de le remercier pour tout cela et pour ses précieux encouragements.

M. Bétrémieux, directeur du Laboratoire des sols de l'I. N. R. A. m'a apporté son appui efficace pour la réalisation de cette recherche, qu'il en soit remercié.

Je tiens à remercier les enseignants de l'Institut de Géologie de la Faculté des Sciences de Strasbourg et en particulier M. Dunoyer de Segonzac qui m'a accueilli avec beaucoup de gentillesse et m'a aidé efficacement au cours des diverses étapes de la réalisation de ce travail.

Je n'aurai garde d'oublier mes collègues du Laboratoire des Sols pour leur aide directe ou indirecte. Je dois une mention toute particulière à L. Turc, dont la maîtrise de la physique et le jugement critique m'ont été particulièrement précieux.

J. Oudard a dû mettre au point, puis réaliser une grande partie des nombreuses expériences. Il s'est acquitté de cette tâche avec beaucoup de conscience. Je tiens à le remercier tout particulièrement de sa contribution à cette recherche.

C'est avec plaisir que je remercie le Bureau de dessin et le Secrétariat qui ont contribué à une meilleure présentation de ce texte.

SUMMARY

EFFECTS OF THE COARSE CONSTITUENTS ON THE DYNAMICS OF WATER IN A SANDY SOIL

III. — DYNAMICS OF WATER IN A FINE-EARTH/COARSE CONSTITUENTS SYSTEM

A previously moistened fine-earth/coarse-constituents system is subjected to desiccation.

When the coarse constituents are not porous, they merely alter the movements of water within the sand.

If the coarse constituents are porous, they yield water in liquid form to the sand when the latter has dried sufficiently so that the fine pores may be filled with water at the expense of the coarse constituents.

The amount of water thus transferred from the coarse constituents to the fine earth depends on the body force of the coarse-constituents/fine-earth system and on the moisture of the fine earth.

ZUSAMMENFASSUNG

EINWIRKUNGEN DER GROBEN BESTANDTEILE AUF DIE BEWEGUNG DES IN SANDIGEM BODEN ENTHALTENE WASSERS

III. — DYNAMIK DES WASSERS IN EINER MISCHUNG VON FEINERDE UND GROBEN BESTANDTEILEN SCHWANKUNGEN BEI RÜCKGANG DER FEUCHTIGKEIT

Eine angefeuchtete Verbindung aus Feinerde und groben Bestandteilen wird der Austrocknung unterworfen.

Wenn die groben Bestandteile nicht porös sind, so beeinflussen die lediglich das Sichverschieben des Wassers in dem Sand.

Enthalten die groben Bestandteile aber Poren, so treten sie Wasserflüssigkeit an den Sand ab, wenn dieser so weith ausgetrocknet ist, dass die feinen Poren sich auf Kosten der groben Bestandteile mit Wasser auffüllen können.

Die Menge des so aus den groben Bestandteilen in die Feinerde übergehenden Wassers hängt von der Mischung der groben Bestandteile und der Feinerde sowie von dem Feuchtigkeitsgehalt der Feinerde ab.

РЕЗЮМЕ

Действие крупных элементов на динамику влаги в песчаной почве.
III. Динамика влаги в системе мелкая почва — крупные элементы.

Р. ГРА.

Предварительно увлажненная система мелкая почва — крупные элементы была подвержена сушке.

В тех случаях когда крупные элементы не пористы, они изменяют только передвижение влаги в песке.

В случаях пористости — они уступают влагу в форме жидкости, песку, когда этот последний достаточно сух, чтобы поры могли заполнятся водой за счет крупного элемента.

Количество влаги, переходящее таким образом от крупных элементов к мелкой почве, зависит от пары крупные элементы — мелкая почва, и от влажности мелкой почвы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Gras R., Monnier G., 1962. Contribution des cailloux à la capacité de réserve en eau du sol. *C. R. Acad. Sc.*, **254**, 3422-3424.

Gras R., Monnier G., 1963. Contribution de certains éléments grossiers du sol à l'alimentation en eau des végétaux. *Sci. Sol*, 1, 13-20.

Hallaire M., Hénin S., 1958. Sur la non validité de l'équation de conductivité pour exprimer le mouvement de l'eau non saturante dans le sol. *C. R. Acad. Sc.*, **246**, 1720-1722.

Puech J., 1966. Modalités de la dessiccation des sols par le gel de silice. *C. R. Acad. Sc.*, **263**, 645-648.

Puech J., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption. *Ann. agron.*, **20** (3), 245-261.

ANNEXE I

MESURE DE LA DENSITÉ RÉELLE

Elle nécessite la connaissance du poids d'un volume réel connu de matériau.

Le poids se mesure avec toute la précision désirable à l'aide d'une balance. La mesure du volume réel présente plus de difficultés ; elle peut se faire avec le pycnomètre à eau ou le pycnomètre à air.

Quelle que soit la méthode utilisée, il faut broyer finement l'échantillon, afin de ne pas compter comme volume de matériau, le volume de pores inaccessibles, qui peuvent éventuellement exister. Pour contrôler que les particules sont suffisamment fines, on vérifie qu'un broyage supplémentaire n'augmente pas la valeur de la densité ainsi mesurée.

A. — *Mesure de la densité réelle avec le pycnomètre à eau*

Ce pycnomètre est un flacon qui se ferme avec un bouchon rodé surmonté d'un capillaire portant un trait de repère.

Connaissant les poids :

A = pycnomètre vide
B = pycnomètre + eau
C = pycnomètre + matériau
D = pycnomètre + matériau + eau

on a :

volume du pycnomètre = B — A
volume occupé par l'eau lorsque le pycnomètre contient le matériau = D — C
volume du matériau = (B — A) — (D — C)
poids de matériau = C — A

La densité réelle d_r est donnée par

$$d_r = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

L'erreur maxima calculée en tenant compte uniquement des erreurs de pesée est très faible. En fait, cette erreur est souvent dépassée à cause de difficultés de réalisation, ou de précautions qui ne sont pas toujours prises.

L'emploi de pycnomètre en pyrex évite les variations de capacité du pycnomètre à la suite de variations importantes de température.

Il faut utiliser une eau qui soit à la même température pour mesurer le volume du pycnomètre, puis le volume du matériau. Sinon, on commet des erreurs appréciables. Il est commode d'ajuster la température de l'eau à une valeur proche de celle du milieu ambiant.

Une cause importante d'erreur provient du fait qu'au moment du remplissage du pycnomètre contenant le matériau, on risque d'emprisonner des bulles d'air. Pour limiter ce risque, on peut opérer de la façon suivante : le pycnomètre contenant le matériau broyé est placé dans une enceinte où l'on fait le vide pendant quelques heures. On remplit ensuite le pycnomètre sous vide dans l'enceinte avec de l'eau bouillie. Comme il peut rester encore quelques bulles d'air, on facilitera leur expulsion, en soumettant le pycnomètre à des variations de température de 10°C environ d'amplitude et en le mettant à nouveau dans une enceinte à vide pendant plusieurs heures.

Au moment de la pesée, les parois extérieures doivent être parfaitement sèches. Pour éviter la formation d'une bulle d'air on remplit souvent le pycnomètre de cette façon : le bouchon rodé est placé sur le corps du pycnomètre plein d'eau. Mais il se forme alors un ménisque à la partie supérieure du col rodé entre les parties mâle et femelle. Ce supplément de poids n'est pas constant d'une pesée à l'autre notamment puisque cette eau s'évapore (quantité évaporée de l'ordre de 10 mg en 1 minute) ; il affecte d'autre part différemment le numérateur et le dénominateur de l'expression de « d_r ». Il faut donc soigneusement essuyer l'eau de ce ménisque ou, mieux, remplir le pycnomètre avec une seringue hypodermique dont on introduit l'aiguille dans le tube capillaire du col rodé.

La reproductibilité d'une mesure, distincte de la précision, traduit l'influence de phénomènes aléatoires et de la variabilité propre au matériau sur la valeur de la mesure. La vraie valeur a une certaine probabilité de se trouver dans l'intervalle $\bar{d}_r \pm ts$, d_r étant la moyenne des mesures, s leur écart type et t le coefficient de Fisher. Par exemple, pour un matériau ayant une densité moyenne de 3,02 ts = 0,059 100 $ts/\bar{d}_r$ = 1,9 p. 100 — seuil 5 p. 100.

B. — *Mesure de la densité réelle avec le pycnomètre à air à comparaison de volume*

Le principe consiste à mesurer le volume d'air occupé par l'échantillon, on est donc assuré que le fluide servant à la mesure pénètre bien dans les pores ouverts, ce qui n'est pas toujours le cas pour le pycnomètre à eau.

L'appareil (fig. A 1) comprend deux corps de pompe identiques, l'un P_1 dit de référence, l'autre P_2 dit de mesure destiné à recevoir l'échantillon de matériau. Ces corps de pompe peuvent être mis en communication avec l'atmosphère par un robinet R (position R_1), ou isolés l'un de l'autre et de l'atmosphère (position R_2). Un manomètre différentiel permet de vérifier l'identité des pressions dans les deux corps de pompe.

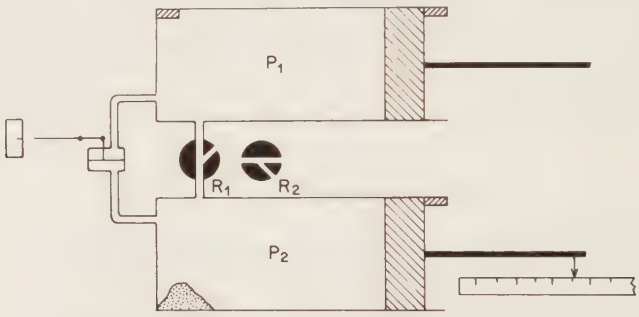


FIG. A 1. — *Schéma de principe d'un pycnomètre à air*

La mesure comprend deux opérations successives :

— les pistons étant tous deux contre leurs butées droites et le cylindre de mesure ne contenant pas d'échantillon, on laisse les cylindres s'emplir d'air à la pression atmosphérique (position R_1 du robinet). On met ensuite le robinet dans la position R_2. On déplace les pistons vers la gauche, en vérifiant que les pressions sont égales au moyen du manomètre différentiel. Lorsque le piston de P_1 est arrêté par la butée gauche, le piston de P_2 a une position à laquelle on attribue la valeur o (volume nul de l'échantillon).

— les pistons ayant été ramenés contre leurs butées droites, et l'échantillon étant placé dans le corps de pompe P_2, les deux cylindres sont emplis d'air à la pression atmosphérique. On supprime la communication entre P_1 et P_2 et on comprime l'air à la même pression dans les deux cylindres, jusqu'à ce que le piston de P_1 parvienne contre sa butée gauche. La position du piston de P_2 est repérée par un nombre v proportionnel au volume réel de l'échantillon ;

La précision obtenue est d'abord reliée à l'étanchéité des pistons et des robinets et à la sensibilité du manomètre différentiel ; tout ceci dépend de la construction de l'appareil.

Les conditions définissant l'état de l'air doivent être identiques dans les deux corps de pompe ; ceci implique qu'il n'y ait pas de différences entre les températures de l'air des deux cylindres, ni d'absorption d'eau par l'échantillon sur lequel on fait la mesure. Ceci implique que les parois des cylindres soient à la même température (se méfier des détentes intempestives de l'air dans un seul corps de pompe). Les mesures de volume réel de corps hygroscopiques ne sont pas possibles, sauf en prenant des précautions particulières.

Comme un calcul d'erreur n'aurait pas grand sens, nous donnons seulement la valeur de la reproductibilité. On a fait 7 mesures de densité réelle en réalisant chaque fois une prise différente sur un échantillon de craie broyée. Au seuil 5 p. 100, on a : ts = 0,138 100 $ts/\bar{d}_r$ = 5,0 p. 100. Cette erreur inclut la variabilité propre à la craie.

On a également vérifié pour un matériau, la craie, que les mesures obtenues au pycnomètre à eau et au pycnomètre à air étaient les mêmes.

La densité réelle s'obtient à partir d'un échantillon finement broyé. La densité pseudo-réelle n'existe que lorsqu'une fraction de la porosité ne communique pas avec l'extérieur ; on utilise alors des fragments du matériau aussi grands que le permet l'enceinte de l'appareil.

ANNEXE 2

DÉPLACEMENT D'UN MÉNISQUE DANS UN CAPILLAIRE CYLINDRIQUE

A. — *Influence de l'inclinaison du capillaire sur la vitesse d'ascension du ménisque*

Un tube capillaire incliné de λ sur l'horizontale affleure par son extrémité inférieure à un plan d'eau.

r = rayon du capillaire
A = tension superficielle de l'eau
x = abscisse du ménisque comptée positivement vers le haut sur l'axe du tube
t = temps
Δp = différence de pression entre le ménisque et le niveau de l'eau
n = viscosité

La loi de Poiseuille s'écrit :

$$dx/dt = (r^2/8n)\ (\Delta p/x)$$

$\Delta p = (2\ A/r - x \sin \lambda)$, en prenant 1 pour masse volumique de l'eau.

$$dx/dt = (r^2/8n) \quad \left(\frac{2\ A/r - x \sin \lambda}{x}\right)$$

$$dx/dt = (r^2/8n) \quad \left(\frac{2\ A/r}{x} - \sin \lambda\right)$$

La vitesse diminue lorsque sin λ croît de 0 à 1, c'est-à-dire lorsque le tube passe de l'horizontale à la verticale.

Pour $\lambda = \pi/2$, tube vertical, $dx/dt = (r^2/8n) \left(\frac{2\ A/r}{x} - 1\right)$

$\lambda = 0$, tube horizontal $dx/dt = (r^2/8n)\ \frac{2\ A/r}{x}$

Pour le tube horizontal la vitesse s'annule à l'infini ; lorsque le tube est incliné la vitesse s'annule lorsque le ménisque atteint la hauteur d'ascension capillaire : $x \sin \lambda = 2\ A/r$, c'est-à-dire lorsque les forces de tension superficielle sont égales au poids de la colonne d'eau.

En intégrant les équations différentielles précédentes on obtient la formule donnant x en fonction de t. Pour

$$0 < \lambda < \pi/2, \quad dx/dt = (r^2/8n) \left(\frac{l \sin \lambda - x \sin \lambda}{x}\right)$$

en exprimant que la hauteur d'ascension capillaire maxima H est telle que $H = 2\ A/r = l \sin \lambda$.

$$dx/dt = (r^2 \sin \lambda/8n)\ \frac{(l - x)}{x}\ \frac{x\ dx}{(l - x)} = (r^2 \sin \lambda/8n)dt$$

Comme :

$$\frac{x}{l - x} = \frac{x - l + l}{l - x} = \frac{-(l - x) + l}{l - x} = -1 + l/(l - x)$$

$$-dx + \frac{l\ dx}{(l - x)} = (r^2/8n)dt$$

$-x + l \operatorname{Log}(l - x) = (r^2/8n)(t + C)$. En écrivant que pour $t = 0$ $x = 0$, $l \operatorname{Log} l = (r^2/8n)C$.

Tout calcul fait :

$$x + l \operatorname{Log} (l - x/l) = - (r^2 \sin \lambda/8n)t.$$

On a fait les calculs avec $r = 0{,}01$ cm, $A = 75$ dyne/cm, $n = 0{,}01$ pour des valeurs de λ de 45° et 90°.

L'abscisse du ménisque dans le tube horizontal est donnée par l'intégration de :

$$dx/dt = (r^2/8n) \frac{2A/r}{x} \qquad x = ((Ar/2n)t)^{\frac{1}{2}}$$

B. — *Influence du rayon d'un capillaire vertical sur la vitesse d'ascension du ménisque*

Comme les formules précédentes sont trop compliquées pour permettre une discussion algébrique, on a construit les courbes $x - t$ pour un capillaire de rayon 0,01 cm et pour un autre de rayon 0,02 cm. Les ménisques passent au même moment à la cote x_1. Dans l'intervalle $0 - x_1$, le ménisque dans le capillaire large est toujours plus élevé que dans le capillaire étroit.

ANNEXE 3

CORRECTION DE FILTRE COMPLEXE

La formule du filtre complexe [1] donne $D = \frac{S(h + l')}{l_1/K_1 + l'/K'}$. En négligeant l'épaisseur de sable grossier l'on obtient : $D = K_{1S} Sh/l$ qui donne $K_{1S} = Dl/Sh$.

Faisons apparaître dans l'expression du filtre complexe le groupement Dl/Sh :

$$D = \frac{S(h + l')}{l/K_1 + l'/K'} = \frac{S\, h(1 + l'/h)}{(l/K_1)\,(1 + (K_1/K')\,(l'/l))}$$

$$K_1 = (Dl/Sh) \frac{1 + (K_1/K')\,(l'/l)}{1 + (l'/h)}.$$

Or $Dl/Sh = K_{1S}$

$$K_1 = K_{1S} \frac{1 + (K_1/K')\,(l'/l)}{1 + (l'/h)}$$

$(K_1/K')\,(l'/l)$ et (l'/h) apparaissent comme termes correctifs.

Dans le terme correctif $(K_1/K')\,(l'/l)$ assimilons K_1 à K_{1S}, ce qui n'entraîne qu'une faible variation de la valeur de ce terme déjà petit :

$$K_1 = K_{1S} \frac{1 + (K_{1S}/K')\,(l'/l)}{1 + (l'/h)} = K_{1S} \frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon'}$$

Pour les tubes longs ($l = 48$ cm)

$$\varepsilon = (0{,}07/15)\,(2/48) = 1{,}9 \cdot 10^{-4}$$
$$\varepsilon' = (2/49) = 4 \cdot 10^{-2}$$
$$(1 + \varepsilon)/(1 + \varepsilon') = 0{,}961$$
$$K_1 = 0{,}96\, K_{1S} \quad K_1/K_{1S} = 0{,}96 \quad 1 - K_1/K_{1S} = 1 - 0{,}96$$
$$(K_{1S} - K_1)/K_{1S} = 0{,}04$$

$\Delta K/K = 0{,}04$, erreur de l'ordre de grandeur de la précision sur K.

Pour les tubes courts ($l = 20$ cm)

$$\varepsilon = (0{,}07/15)\,(3/20) = 7.10^{-3}$$
$$\varepsilon' = 3/21 = 0{,}15$$
$$(1 + \varepsilon)\,(1 + \varepsilon') = 0{,}87$$

$\Delta K/K = 0{,}13$; le fait de négliger que le tube soit complexe introduit une erreur considérable.

Pour les mesures de perméabilité, traiter le filtre comme s'il était simple surestime de façon appréciable la valeur de la perméabilité mesurée, lorsque le rapport épaisseur de sable grossier/épaisseur de terre dont la perméabilité est à mesurer est trop grand.

[1] Figure 3, deuxième partie.

ANNEXE 4

PRÉCISION SUR LA MESURE DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ K

L'erreur relative maxima sur un produit F de facteurs est la somme des erreurs sur les différents facteurs de l'expression. Lorsque l'expression F est compliquée, il est commode d'en prendre la différentielle logarithmique dlog F = dF/F, en transformant les signes — en signe +. Ceci revient à se placer dans le cas le plus défavorable où toutes les erreurs jouent dans le même sens, par exemple par excès.

Lorsque le nombre des termes d'une expression augmente, il est de moins en moins probable que les erreurs sur tous les termes soient dans le même sens. *L'erreur relative moyenne* est ainsi surestimée.

On pallie en partie cet inconvénient en prenant comme évaluation de dF/F la racine carrée de la somme des carrés des erreurs relatives sur chaque terme.

Nous ne nous sommes pas livrés à ce calcul. Les erreurs calculées seront donc des erreurs maxima qui ont une probabilité minime d'être dépassées, et non des erreurs moyennes.

$$K = Dl/Sh \qquad \log K = \log D + \log l - \log S - \log h$$
$$\Delta \log K = \Delta K/K = \Delta D/D + \Delta l/l + \Delta S/S + \Delta h/h$$
$$D = Q/t \qquad \Delta D/D = \Delta Q/Q + \Delta t/t$$
$$Q = 100 \text{ ml} \qquad Q = 0{,}1 \text{ ml} \qquad \Delta Q/Q = 0{,}001$$
$$t = 3\,600 \text{ s.} \qquad t = 1 \text{ s.} \qquad \Delta t/t = 0{,}000\,2$$
$$\Delta D/D = 0{,}001$$
$$S = (\pi/4)\, a^2 \quad (a = \text{diamètre})$$
$$\Delta S = (\pi/2)\, a \cdot \Delta a$$
$$\Delta S/S = 2\, \Delta a/a$$

$a = 5{,}4$ cm $\Delta a = 0{,}05$ cm (mesure au pied à coulisse) $\Delta S/S = 0{,}018$

L'erreur sur la longueur étant de 0,1 cm $\Delta h = \Delta l = 0{,}1$

Pour les tubes courts $h = 21$ $l = 20$

$$\Delta h/h = 0{,}004$$
$$\Delta l/l = 0{,}005$$

Pour les tubes longs $h = 49$ $l = 48$

$$\Delta h/h = 0{,}002$$
$$\Delta l/l = 0{,}002$$

$\Delta K/K = 2{,}8$ p. 100 pour les tubes courts.
$\Delta K/K = 2{,}3$ p. 100 pour les tubes longs.

ANNEXE 5

PRÉCISION SUR LE CALCUL DU RAPPORT $(D_1/D_2)c$ DANS LES EXPÉRIENCES AVEC LES ÉLÉMENTS NON POREUX

(cylindres de matériaux non poreux de grand diamètre)

$$(D/D_2)c = \frac{S(l_1/S + l_2/(S - u) + l_3/S)}{l_1 + l_2 + l_3}$$

$$\log (D/D_2)c = \log S + \log [l_1/S + l_2/(S - u) + l_3/S] - \log (l_1 + l_2 + l_3)$$

$$\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = \Delta S/S + \Delta \frac{(l_1/S + l_2/(S - u) + l_3/S}{l_1/S + l_2/(S - u) + l_3 S} + \frac{\Delta(l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3}$$

$$\Delta\,(l_1/S) = \Delta\,l_1/S + (\Delta\,S/S^2)l_1$$

$$\Delta\,(l_2/(S-u)) = \Delta\,l_2/(S-u) + \frac{(\Delta\,S + \Delta\,u)l_2}{(S-u)^2}$$

$$\Delta\,(l_3/S) = \Delta\,l_3/S + (\Delta S/S^2)l_3$$

$$\frac{\Delta\,(l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S}{l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S} = \frac{(\Delta l_1 + \Delta l_3)/S + (l_1 + l_3)\,(\Delta S/S^2) + \Delta l_2(S-u) + l_2(\Delta S + \Delta u)/(S-u)}{l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S}$$

$$\frac{\Delta\,(l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3} \qquad \frac{\Delta\,l_1 + \Delta\,l_2 + \Delta\,l_3}{l_1 + l_2 + l_3}$$

d'après l'annexe 1 $\Delta\,S/S = 0{,}018\ 0$

$l_2 = 11$ cm

tubes courts $l_1 + l_2 + l_3 = 20$ cm $l_1 + l_3 = 9$ cm

tubes longs $= 48$ cm $= 37$ cm

$S = 21$ cm² $u = 12{,}5$ cm² $S - u = 8{,}5$ cm²

$S = \pi\,a^2/4$ (a — diamètre) $\Delta S = (\pi/2)\ a \cdot \Delta a$

$a = 5{,}4$ cm $\Delta a = 0{,}05$ cm

$\Delta S = 0{,}4$ cm²

$\Delta\,u = (\pi/2)\ a \cdot \Delta a$

$a = 4$ cm $\Delta\ a = 0{,}05$

$\Delta\ u = 0{,}3$ cm²

$\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3 = 0{,}1$ cm

la valeur de l'expression centrale est 0,010 0

$3\,\Delta l/(l_1 + l_2 + l_3) = 0{,}015\ 0$

pour les tubes courts $\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = 4{,}3$ p. 100

pour les tubes longs $= 3{,}5$ p. 100

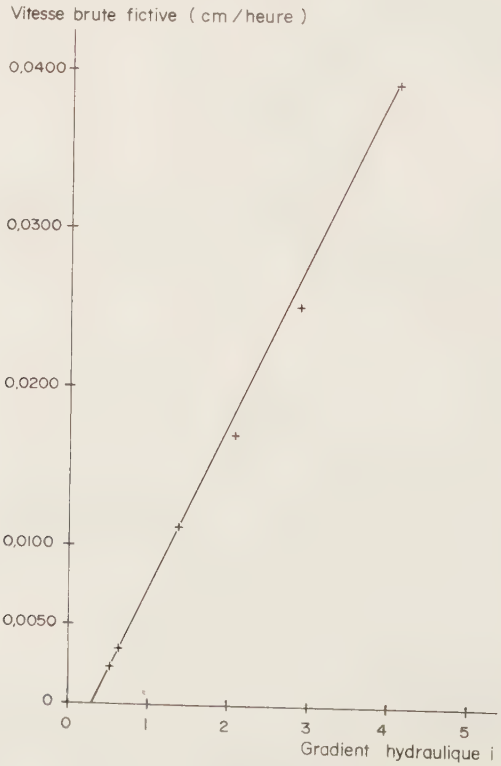


FIG. A 2. — *Perméabilité de la craie*

ANNEXE 6

FILTRATION DE L'EAU DANS LA CRAIE

La loi de Darcy $D = KS\ h/l$ peut s'écrire $D/S = Kh/l$,

ou en posant $D/S = V$: vitesse brute fictive

$h/l = i$: gradient hydraulique

$V = Ki$

La droite représentative de $V = Ki$ passe par l'origine.

Pour la craie les points expérimentaux se placent sur une droite qui ne passe pas par l'origine (fig. A 2), c'est-à-dire que la circulation de l'eau ne commence que lorsque i dépasse la valeur i_0 :

$$V = K\,(i - i_0).$$

donc K varie avec le gradient hydraulique.

ANNEXE 7

PRÉCISION SUR LE CALCUL DU RAPPORT $(D_1/D_2)_c$ DANS LES EXPÉRIENCES AVEC LES ÉLÉMENTS POREUX

(cylindres poreux de grand diamètre et tubes longs)

$$(D_1/D_2)_c = (l_1 + l_2 + l_3)^{-1} \cdot \left(l_1 + l_3 + \frac{l_2 K_1 S}{K_1(S - u) + K_2 u}\right)$$

$$\log (D_1/D_2)_c = -\log (l_1 + l_2 + l_3) + \log \left(l_1 + l_3 + \frac{l_2 K_1 S}{K_1(S - u) + K_2 u}\right)$$

$$\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3}{l_1 + l_2 + l_3} + \frac{\Delta l_1 + l_3 + l_2 K_1 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)}{l_1 + l_3 + l_2 K_1 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)}$$

$$\Delta(l_1 + l_3 + l_2 K_1 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)) = \Delta l_1 + \Delta l_3 + \Delta l_2 K_1 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)$$
$$+ \Delta K_1 \cdot l_2 S/(K_1 (S - u) + K_2 u)$$
$$+ \Delta S \cdot l_2 K_1/(K_1 (S - u) + K_2 u)$$

$$+ l_2 \cdot K_1 S \frac{(\Delta K_1 \cdot (S - u) + (\Delta S + \Delta u)\, K_1 + \Delta K_2 \cdot u + \Delta u \cdot K_2)}{(K_1 (S - u) + K_2 u)^2} =$$

$$\Delta l_1 + \Delta l_3 + (\Delta l_2 \cdot K_1 S + \Delta K_1 \cdot l_2 S + \Delta S \cdot l_2 K_1)/(K_1 (S - u) + K_2 u)$$

$$+ \frac{l_2 K_1 S\,(\Delta K_1 \cdot (S - u) + (\Delta S + \Delta u)\, K_1 + \Delta K_2 \cdot u + \Delta u \cdot K_2)}{(K_1 (S - u) + K_2 u)^2}.$$

Erreur sur le 1er terme : $= 3\,\Delta l/(l_1 + l_2 + l_3) = 0{,}006$

En admettant pour K_2 une précision de 10 p. 100, comme $K_2 = 0{,}000\,3$ $\Delta K_2 = 0{,}000\,03$

Erreur sur 2e terme : $= 0{,}095$

$$\Delta(D_1/D_2) \,/\, (D_1/D_2) = 11 \text{ p. } 100$$

Cette valeur est certainement supérieure à la réalité puisque, il est vraisemblable que certaines erreurs de sens inverse se compensent, le calcul de (D_1/D_2) nécessitant 7 paramètres.

ANNEXE 8

INFILTRATION DE L'EAU DANS LA CRAIE

Si l'on maintient une lame d'eau d'épaisseur constante « *a* » au-dessus d'un échantillon de craie sèche de section « S », il se forme un front humide qui se déplace vers le bas (fig. A 3).

FIG. A 3. — *Infiltration de l'eau dans la craie*

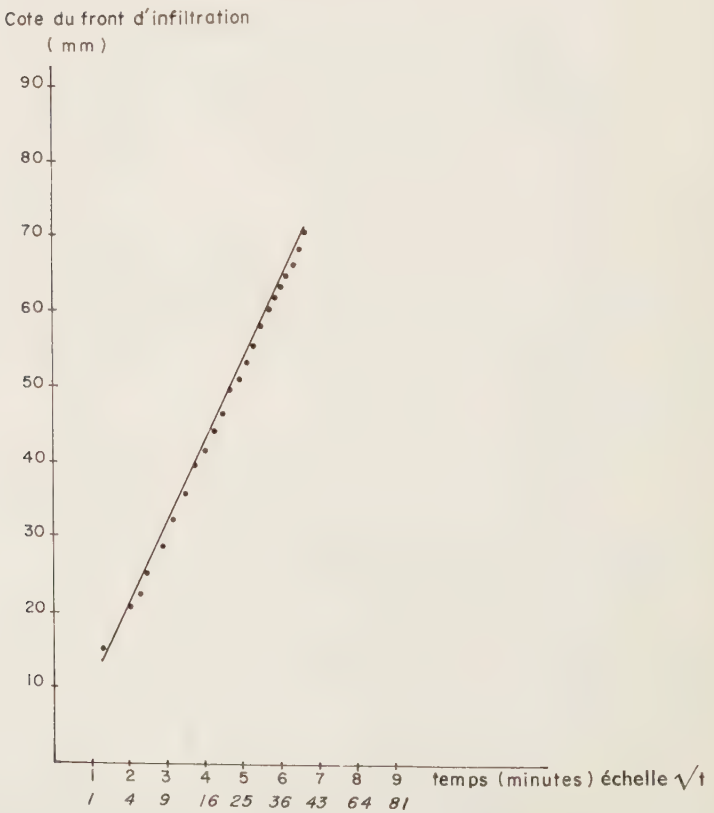


FIG. A 4. — *Infiltration de l'eau dans la craie. Cote du front humide et temps*

Le débit instantané D_z au moment où le front humide est à la cote z est

$D_z = KS\left(\frac{a + z + \psi}{z}\right)$, K étant la perméabilité de la craie.

En prenant comme valeur de a : 1 cm, de z : 100 cm, la valeur de ψ étant 2 200 cm, $(a + z)$ est petit devant ψ. On peut donc en première approximation négliger $a + z$.

Écrivons D_z de façon à faire apparaître l'erreur commise en négligeant $a + z$ devant ψ :

$$D_z = KS\frac{\psi}{z}\left(1 + \frac{(a + z)}{\psi}\right)$$

Comme $(a + z) / \psi = 101/2\,200 = 4{,}5$ p. 100 $= \varepsilon$

$$D_z = KS\frac{\psi}{z}(1 + \varepsilon) \cdot \# KS\frac{\psi}{z}$$

Si on considère le déplacement du front humide on a :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{100\ K}{P}\frac{\psi}{z} \qquad z \cdot dz = \frac{100\ K}{P}dt$$

$$z^2 = (200\ K\ P)\ t$$

$$D = \frac{dQ}{dt} = KS\frac{\psi}{z} = \frac{KS\ \psi}{\sqrt{\frac{200\ K}{P}}\sqrt{t}} \qquad Q = \frac{KS\ \psi}{\sqrt{\frac{200\ K}{P}}}\sqrt{t}$$

Ces expressions sont identiques à celles obtenues dans le cas de la circulation horizontale, ce qui est normal, puisque le seul effet pris en compte est celui de la succion.

Les points expérimentaux représentant la cote z et $\sqrt{t}$ s'ordonnent autour d'une droite (fig. A 4), ce qui confirme bien la validité de l'approximation effectuée. Signalons que cette dernière est d'autant meilleure que la profondeur humectée est plus faible : pour $z = 10$ cm, $\varepsilon = 0{,}45$ p. 100.

ANNEXE 9

DOSAGE DU CHLORE PAR POTENTIOMÉTRIE AVEC LE NITRATE D'ARGENT

Le chlore est dosé par le nitrate d'argent suivant la réaction :

$$Ag^+ + Cl^- \leftrightharpoons ClAg \downarrow$$

On aurait pu extraire le chlorure de calcium du sable par lessivage à l'eau et déterminer le point équivalent (qui correspond au moment où l'on a mis en présence de Cl^- la quantité théoriquement nécessaire de Ag^+), avec le chromate de potassium comme indicateur. Mais le liquide d'extraction est coloré, ce qui enlève toute précision à la méthode. Ceci nous a conduit à fixer le point équivalent par potentiométrie. Cette méthode présente, en outre, l'avantage de supprimer l'extraction préalable du chlorure par lessivage, le dosage s'effectuant directement sur la suspension.

Le potentiel d'une électrode parcourue par un courant d'intensité connue (qui peut être nulle) est fonction de la concentration du corps susceptible d'échanger des électrons :

$$Ag^+ + Cl^- - e \leftrightharpoons AgCl \downarrow$$
$$E = E_o - 0{,}058 \log (Cl^-) ;$$

(Cl^-) étant l'activité du chlore.

Le dispositif de mesure comprend donc une électrode inattaquable, dite électrode indicatrice, dont le rôle est uniquement de céder ou d'accepter des électrons. C'est une électrode Ag/ClAg, qui est constituée d'un fil d'argent plongée dans la solution à doser ; on admet que, dès le début du dosage, l'électrode d'argent se recouvre de chlorure d'argent. Le potentiel de cette électrode est mesuré par rapport à celui d'une électrode dont le potentiel reste constant : l'électrode de référence, dans notre cas une électrode au sulfate mercureux (mercure/Hg_2SO_4/K_2SO_4 saturé)

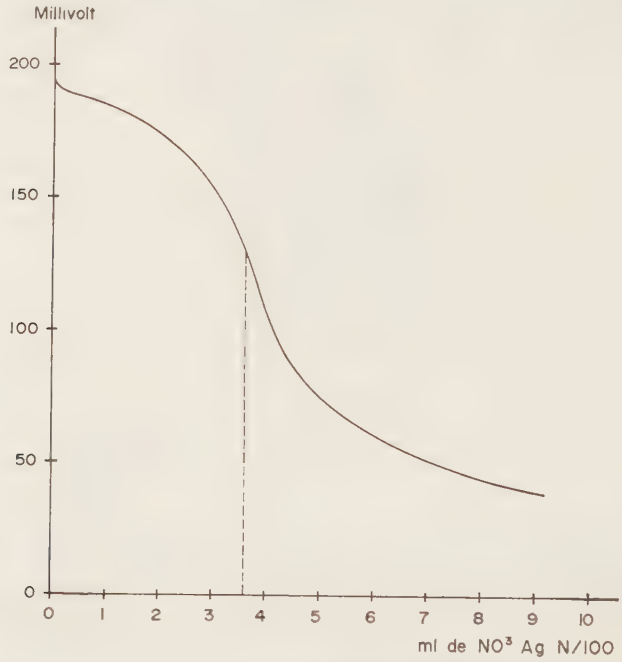


FIG. A 5. — *Courbe de titrage potentiométrique du chlore*

Au moment où la précipitation des chlorures par le nitrate d'argent est complète, il y a une saute de potentiel indiquant le point équivalent. En fait, on a une courbe d'allure sigmoïdale $E = f(cm^3\ AgNO^3)$ (fig. A 5). Le point équivalent est indiqué par un point singulier de cette courbe, ici le point d'inflexion.

Pour éviter que la phase solide ne perturbe l'homogénéité de la phase liquide de suspension, on ne met pas plus de 20 g de sol dans 100 ml d'eau. La suspension est maintenue homogène par un agitateur magnétique pendant le dosage.